

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-148539

(43)Date of publication of application : 29.05.2001

(51)Int.Cl.

H01S 5/20
G11B 7/125
H01S 5/343

(21)Application number : 2000-256218

(71)Applicant : SHARP CORP

(22)Date of filing : 25.08.2000

(72)Inventor : YAMAZAKI YUKIO
OKUMURA TOSHIYUKI

(30)Priority

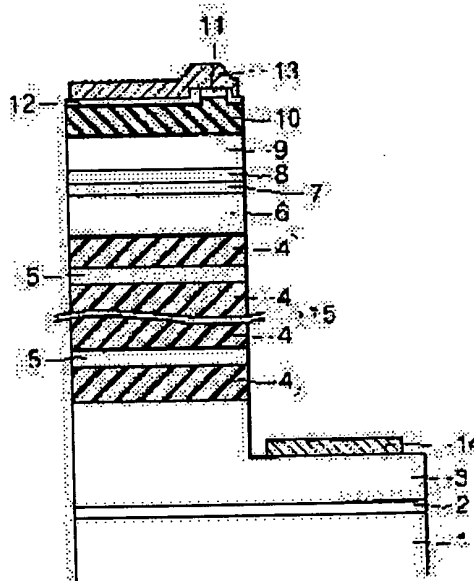
Priority number : 11256485 Priority date : 10.09.1999 Priority country : JP

(54) NITRIDE SEMICONDUCTOR LASER DEVICE AND OPTICAL INFORMATION REPRODUCING APPARATUS

(57)Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a nitride semiconductor laser device which is best suited for application to optical pickups, etc., with good yield and realize an optical information reproducing apparatus superior in condensing characteristics.

SOLUTION: This nitride semiconductor laser device comprises an $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.08 \leq x \leq 0.2$) lower clad layer 4, an active layer 7 having a multilayer structure of alternately layered $\text{In}_w\text{Ga}_{1-w}\text{N}$ well layers and $\text{In}_v\text{Ga}_{1-v}\text{N}$ barrier layers, an $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.08 \leq x \leq 0.2$) upper clad layer 10 formed, in this order on a substrate 1, and one or a plurality of $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ ($0 \leq z \leq 0.2$) buffer layers 5 of 200 nm or less are interposed in the lower clad layer 4 and/or the upper clad layer 10.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

BEST AVAILABLE COPY

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(43)公開日 平成13年5月29日(2001.5.29)

テーマト* (参考)

H O 1 S 5/20

G 1 1 B 7/125

H01S 5/343

A

審査請求 未請求 請求項の数12 O L (全 52 頁)

(21)出願番号 特願2000-256218(P2000-256218)

(22) 出願日 平成12年8月25日(2000.8.25)

(31)優先權主張番号 特願平11-256485

(32)優先日 平成11年9月10日(1999.9.10)

(33)優先権主張国 日本(JP)

(71)出願人 000005049

シャープ株式会社

大阪府大阪市阿倍野区长池町22番22号

(72) 發明者 山簡 幸生

大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号 シ

ヤープ株式会社内

(72)発明者 奥村 敏之

大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号 シ

ヤープ株式会社内

(74) 代理人 100064746

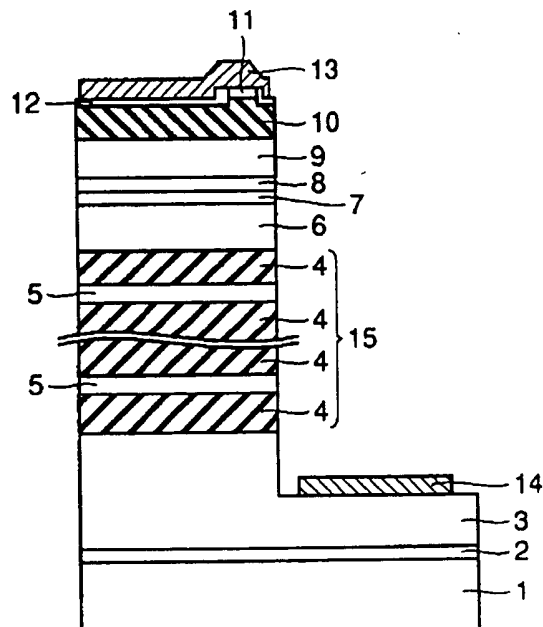
井理士 深見 久郎

(54)【発明の名称】 窒化物系半導体レーザ素子および光学式情報再生装置

(57) 【要約】

【課題】 光ピックアップ等への応用に最適な窒化物半
導体レーザ素子を歩留まり良く提供し、また、集光特性
の優れた光学式情報再生装置を実現する。

【解決手段】 窒化物系半導体レーザ素子は、 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0.08 \leq x1 \leq 0.2$) 下部クラッド層4と、 $In_wGa_{1-w}N$ 井戸層と $In_vGa_{1-v}N$ 障壁層との交互多層構造からなる活性層7と、 $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.08 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層10とが基板1側からこの順に形成された層を含み、該下部クラッド層4中または／かつ該上部クラッド層10中に、 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層5 (膜厚200nm以下) が単層または複数層介装されている。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0.08 \leq x1 \leq 0.2$) 下部クラッド層と、 $In_vGa_{1-v}N$ 井戸層と $In_vGa_{1-v}N$ 障壁層との交互多層構造からなる活性層と、 $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.08 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層とが基板側からこの順に形成された層を含み、前記下部クラッド層中または／かつ上部クラッド層中に、膜厚200nm以下の $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層が単層または複数層介装されている窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項2】 積層面に垂直方向のファーフールドパターンにおけるリップルが抑制されるように、前記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層の膜厚と組成を設定してなることを特徴とする請求項1に記載の窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項3】 前記上部または／かつ下部クラッド層の総膜厚は、 $0.8 \mu m$ 以上 $10 \mu m$ 以下の範囲に設定してなることを特徴とする、請求項1または2に記載の窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項4】 前記下部／上部クラッド層に介装された少なくとも1層の $In_zGa_{1-z}N$ 緩衝層において、各 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層 (誘電率 ϵ_i) および両隣の下部／上部クラッド層 (誘電率 ϵ_A) で構成される導波路の導波モード (等価屈折率 n_{eq} 、半導体層に対し垂直方向の電界分布 $f_i(x)$) と、前記半導体レーザ素子の発振光の導波層および下部クラッド層および上部クラッド層で構成される導波路の導波モード (等価屈折率 n_{eq} 、半導体層に対し垂直方向の電界分布 $f_{eq}(x)$) とで決定されるパラメータ F について、 $F < 0.4$ の関係が成立するように、前記緩衝層の膜厚と組成を設定してなることを特徴とする請求項1から3のいずれかに記載の窒化物系半導体レーザ素子。但し、 $F = 1 / \{1 + (\Delta / \kappa)^2\}$

$$\Delta = (\pi / \lambda) (n_{eq} - n_i)$$

$$\kappa = (\omega \cdot \epsilon_0 / 4) \int \{f_{eq}(x) \cdot \delta \epsilon(x) \cdot f_i(x)\} dx$$

$$\delta \epsilon(x) = \epsilon_i - \epsilon_A(x; In_zGa_{1-z}N \text{ 緩衝層内}), 0(x; \text{それ以外})$$

$$\omega = 2\pi c_0 / \lambda$$

λ ; 真空中における発振光の波長

c_0 ; 真空中の光速

ϵ_0 ; 真空中の誘電率

で与えられるものとする。

【請求項5】 前記下部クラッド層と活性層の間に GaN 下部ガイド層 (膜厚 $0.08 \sim 0.15 \mu m$) を有しており、かつ前記上部クラッド層と活性層との間に GaN 上部ガイド層 (膜厚 $0.08 \sim 0.15 \mu m$) を有しており、前記下部クラッド層に介装された前記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から前記 GaN 上部ガイド層までの距離、もしくは前記上部クラッド層に介

装された前記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から前記 GaN 上部ガイド層までの距離を $d [\mu m]$ 、前記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から前記 GaN 下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均 Al 組成、もしくは前記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から前記 GaN 上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均 Al 組成を $0.08 \leq x \leq 0.2$ とし、前記緩衝層の組成 p_1 および膜厚 $t_1 [nm]$ が、

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 1 / (0.0080268 + 0.58533 p_1) \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq -8.9956 + 273.95 p_1 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 1 / (0.00017672 + 0.088604 p_1) \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } -103.63 + 2403.3 p_1 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 1 / (0.0067725 + 0.50578 p_1) \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq -10.86 + 321.88 p_1 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 1 / (0.0014296 + 0.13014 p_1) \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } -42.254 + 1273.3 p_1 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (0.0044063 + 0.3622 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq -17.958 + 479 p_1 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } (0.0031223 + 0.26847 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } -25.867 + 664.45 p_1 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする請求

項1から4のいずれかに記載の窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項6】 前記下部クラッド層と活性層の間に0%以上2%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層（膜厚0.08~0.15μm）を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に0%以上2%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層（膜厚0.08~0.15μm）を有しており、前記下部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N（0≤z≤0.2）緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離、もしくは前記上部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N（0≤z≤0.2）緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd

[μm]、前記InGa_{1-z}N緩衝層から前記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均Al組成、もしくは前記InGa_{1-z}N緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を0.08≤x≤0.2とし、前記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁[nm]が、

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (0.002182 + 0.2838 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq -27.916 + 631.14 p_1 + 418.94 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } (-0.0013694 + 0.16355 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 60.409 - 840.5 p_1 + 10843 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (0.0028147 + 0.32751 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq -24.449 + 560.59 p_1 + 222.45 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } (-0.0011606 + 0.13789 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 81.043 - 1159.4 p_1 + 13537 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (0.00399$$

$$42 + 0.39645 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq -21.331 + 488.13 p_1 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } (-0.00076798 + 0.093666 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 108.61 - 1511.6 p_1 + 19016 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする請求項1から4のいずれかに記載の窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項7】 前記下部クラッド層と活性層の間に2%以上4%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層（膜厚0.08~0.15μm）を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に2%以上4%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層（膜厚0.08~0.15μm）を有しており、前記下部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N（0≤z≤0.2）緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離、もしくは前記上部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N（0≤z≤0.2）緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd

[μm]、前記InGa_{1-z}N緩衝層から前記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均Al組成、もしくは前記InGa_{1-z}N緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を0.08≤x≤0.2とし、前記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁[nm]が、

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.00057916 + 0.20257 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 20.248 - 212.49 p_1 + 6390 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } (-0.0025782 + 0.14902 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 345.07 - 6361.6 p_1 + 39339 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.000048081 + 0.22812 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200$$

かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 6.7893 + 7.0097 p_1 + 4.779.4 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0024039 + 0.13561 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $410.2 - 7584.7 p_1 + 46101 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.000076166 + 0.27608 p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq -4.9294 + 213.76 p_1 + 2827.4 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $(-0.0018961 + 0.10494 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $536.08 - 9966.9 p_1 + 60707 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする請求項1から4のいずれかに記載の窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項8】 前記下部クラッド層と活性層の間に4%以上6%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μ m）を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に4%以上6%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μ m）を有しており、前記下部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N（0 $\leq z \leq 0.2$ ）緩衝層から前記Ga_N上部ガイド層までの距離、もしくは前記上部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N（0 $\leq z \leq 0.2$ ）緩衝層から前記Ga_N上部ガイド層までの距離をd[μ m]、前記InGa_N緩衝層から前記Ga_N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均Al組成、もしくは前記InGa_N緩衝層から前記Ga_N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を0.08 $\leq x \leq 0.2$ とし、前記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁[nm]が、

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0036588 + 0.15804 p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ 0.00

$1 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 1192.2 - 22262 p_1 + 112670 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.4$ かつ $(-0.0035017 + 0.14571 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

10 または

$d \geq 0.4$ かつ $524.75 - 10029 p_1 + 59406 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0029727 + 0.18468 p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 211.87 - 3874.3 p_1 + 25752 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0033291 + 0.13586 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $587.7 - 11264 p_1 + 66380 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0031947 + 0.21903 p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq 139.37 - 2496.5 p_1 + 17831 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $(-0.0028237 + 0.11113 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $766.52 - 14773 p_1 + 86589 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする請求項1から4のいずれかに記載の窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項9】 前記下部クラッド層と活性層の間に6%以上7%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μ m）を有しており、かつ上部ク

ラッド層と活性層との間に6%以上7%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、前記下部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N(0 \leq z \leq 0.2)緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離、もしくは前記上部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N(0 \leq z \leq 0.2)緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd[μ m]、前記InGa_{1-z}N緩衝層から前記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均A1組成を0.08 \leq x \leq 0.2とし、前記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁[nm]が、

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0036588 + 0.15804 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 1192.2 - 22262 p_1 + 112670 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } (-0.0041761 + 0.13916 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 958.16 - 18852 p_1 + 105870 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0038108 + 0.16856 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 973.69 - 8186 p_1 + 93321 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } (-0.0040339 + 0.13236 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 1056.2 - 20815 p_1 + 116460 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0040773 + 0.19547 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 539.75 - 10088 p_1 + 54757 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

$$0.9 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } (-0.0035424 + 0.11285 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 1335.8 - 26428 p_1 + 147260 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

10 のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする請求項1から4のいずれかに記載の窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項10】 前記下部クラッド層と活性層の間に7%以上10%以下のInを少なくとも含む下部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に7%以上10%以下のInを少なくとも含む上部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、前記下部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N(0 \leq z \leq 0.2)緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離、もしくは前記上部クラッド層に介装された前記In_zGa_{1-z}N(0 \leq z \leq 0.2)緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd[μ m]、前記InGa_{1-z}N緩衝層から前記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均A1組成、もしくは前記InGa_{1-z}N緩衝層から前記Ga_{1-z}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均A1組成を0.08 \leq x \leq 0.2とし、前記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁[nm]が、

$$20 \quad d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.004347 + 0.14719 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 858.55 - 16866 p_1 + 95186 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } (-0.005134 + 0.1362 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$40 \quad d \geq 0.4 \text{ かつ } 2497.8 - 49961 p_1 + 264020 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0044872 + 0.15446 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 780.25 - 15299 p_1 + 86683 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

50 または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0049851 + 0.13106 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $2705.9 - 54159 p_1 + 285760 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0048885 + 0.17591 p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq 597.65 - 11661 p_1 + 66983 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $(-0.0044282 + 0.11446 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $3324.9 - 66656 p_1 + 351050 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする請求項1から4のいずれかに記載の窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項11】 前記下部クラッド層と、基板との間に、0%以上20%以下のInを少なくとも含むIn_rGa_{1-r}N緩衝層が、少なくとも1層介装されている請求項1から10のいずれかに記載の窒化物系半導体レーザ素子。

【請求項12】 情報記録面を有する光ディスクに照射されたレーザ光の反射光を光変換することにより、該光ディスクに記録された記録情報を再生する光学式情報再生装置であって、請求項1から請求項11のいずれかに記載の半導体レーザ素子を光源として用いることを特徴とする光学式情報再生装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、窒化ガリウム系半導体を用いた半導体レーザ素子およびそれをを用いた光学式情報再生装置に関し、特に、FFP（ファーフールドパターン）が良好な半導体レーザ装置に関する。

【0002】

【従来の技術】GaN、InN、AlNおよびそれらの混晶半導体に代表される窒化物系半導体材料により、青色から紫外領域で発光する半導体レーザ素子が試作されている。図22は、先に本出願人により出願された特開平9-55560号公報の窒化物半導体レーザ素子（または発光ダイオード）を示す模式図であり、半導体レー

ザの導波路ストライプ部分の共振器に垂直な断面を示している。本半導体レーザ素子（または発光ダイオード）は、サファイア基板191上に、薄層のGaNまたはAlNまたはAlGaNからなる低温バッファ層192が形成され、その上に、n型GaNコンタクト層193、n型下部クラッド層202、ノンドープまたはSiドープAlGaInN活性層196（または発光層）、p型上部クラッド層197およびp型GaNコンタクト層198が積層形成されている。p型コンタクト層198の上には正電極200が形成されている。また、n型GaN層の上部が一部露出するように、その上側のn型下部クラッド層、活性層（または発光層）、p型上部クラッド層およびp型GaNキャップ層は部分的に除去され、露出したn型GaN層の部分の上に負電極201が形成されている。

【0003】本半導体レーザ素子では、n型下部クラッド層は、厚み約0.15~0.3μmのn型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層194と厚み約200オングストロームのn型Al_aGa_{1-a}N（0≤a≤1）緩衝層195とを繰り返し成長して下部クラッド層202の厚みを各々約1μmとしている。

【0004】n型下部クラッド層の総膜厚は、レーザ発振モードの電界分布がn型GaNコンタクト層へ染み出し、これによるFFPにおけるリップルの発生を防止するためには厚いほど望ましいが、結晶成長の困難さのため、n型GaN層上に歩留まり良く成長できるn型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層の層厚は制限される。なお、本明細書中では、半導体多層膜に垂直な方向の、半導体レーザ素子構造中における光電界分布およびFFPを問題にしており、これを単に各々電界分布およびFFPと記載している。そのため、本半導体レーザ素子では、n型下部クラッド層は、厚み約0.15~0.3μmのn型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層と厚み約200オングストロームのn型Al_aGa_{1-a}N（0≤a≤1）緩衝層とを繰り返し成長することにより、n型下部クラッド層の総膜厚を約1μmとしている。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記従来の半導体レーザ素子では、以下に示すような問題が生じる。本発明者らにより上記構造の半導体レーザ素子を実際に作製し、表面を光学顕微鏡で約200倍に拡大して観察したところ、表面がきれいなウェハであれば、ウェハの周辺部で六角形のクラックが発生しているウェハも確認された。より具体的には、10枚のウェハの内8枚のウェハで、このような六角形のクラックが発生している様子が確認された。

【0006】また、レーザ素子構造のウェハの内、クラックの生じていない部分を素子化したところ、閾値電流密度2~3kA/cm²程度でレーザ発振を生じたが、クラックの生じたところを素子化したものでは、レーザ

発振を生じた素子の数は、30個中15個であった。

【0007】このように、緩衝層としてAlNまたはGaNを用いた場合は、十分なクラック防止効果が見られず、それにより深刻な歩留まりの低下が生ずるという問題があった。

【0008】本発明は、上記問題を解消し、光ピックアップ等への応用に最適な窒化物半導体レーザ素子を歩留まり良く提供し、また、集光特性の優れた光学式情報再生装置を実現することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】〔1〕上記目的を達成するため、本発明に基づく窒化物系半導体レーザ素子は、 $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0.08 \leq x1 \leq 0.2$) 下部クラッド層と、 $In_vGa_{1-v}N$ 井戸層と $In_vGa_{1-v}N$ 障壁層との交互多層構造からなる活性層と、 $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.08 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層とが基板側からこの順に形成された層を含み、該下部クラッド層中または／かつ該上部クラッド層中に、 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層 (膜厚200nm以下) が単層または複数層介装されていることを特徴とする。

【0010】〔2〕上記発明において好ましくは、積層面に垂直方向のファーフールドパターンにおけるリップルが抑制されるように、上記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層の膜厚と組成を設定してなることを特徴とする。

【0011】〔3〕上記発明において好ましくは、上記上部または／かつ下部クラッド層の総膜厚が、0.8μm以上10μm以下の範囲に設定してなることを特徴とする。

【0012】〔4〕上記発明において好ましくは、上記下部／上部クラッド層に介装された少なくとも1層の少なくとも1層の $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層において、各 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層 (誘電率 ϵ_i) および両隣の下部／上部クラッド層 (誘電率 ϵ_A) で構成される導波路の導波モード (等価屈折率 n_i 、半導体層に対し垂直方向の電界分布 $f_i(x)$) と、上記半導体レーザ素子の発振光の導波層および下部クラッド層および上部クラッド層で構成される導波路の導波モード (等価屈折率 n_{eq} 、半導体層に対し垂直方向の電界分布 $f_{eq}(x)$) とで決定されるパラメータ F について、 $F < 0.4$ の関係が成立するように、上記緩衝層の膜厚と組成を設定してなることを特徴とする。但し、

$$F = 1 / \{ 1 + (\Delta / \kappa)^2 \}$$

$$\Delta = (\pi / \lambda) (n_{eq} - n_i)$$

$$\kappa = (\omega \cdot \epsilon_0 / 4) \{ \{ f_{eq}(x) \cdot \delta \epsilon(x) \cdot f_i(x) \} dx$$

$$\delta \epsilon(x) = \epsilon_i - \epsilon_A(x; In_zGa_{1-z}N \text{ 緩衝層内}), 0(x; \text{それ以外})$$

$$\omega = 2\pi c_0 / \lambda$$

λ ; 真空中における発振光の波長

c_0 ; 真空中の光速

ϵ_0 ; 真空中の誘電率

で与えられるものとする。

【0013】〔5〕上記発明において好ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間にGaN下部ガイド層 (膜厚0.08~0.15μm) を有しており、かつ $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0.08 \leq x2 \leq 0.2$) 上部クラッド層と活性層との間にGaN上部ガイド層 (膜厚0.08~0.15μm) を有しており、上記下部クラッド層に介装された上記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から上記GaN上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から上記GaN上部ガイド層までの距離を d [μm]、上記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から上記GaN下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均Al組成、もしくは上記 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から上記GaN上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を $0.08 \leq x \leq 0.2$ とし、上記緩衝層の組成 p_i および膜厚 t_i [nm] が、

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_i \leq 1 / (0.0080268 + 0.58533p_i) \text{ かつ } 0.001 \leq p_i \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_i \leq -8.9956 + 273.95p_i \text{ かつ } 0.09 < p_i \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 1 / (0.00017672 + 0.088604p_i) \leq t_i \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_i \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } -103.63 + 2403.3p_i \leq t_i \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_i \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_i \leq 1 / (0.0067725 + 0.50578p_i) \text{ かつ } 0.001 \leq p_i \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_i \leq -10.86 + 21.88p_i \text{ かつ } 0.09 < p_i \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 1 / (0.0014296 + 0.13014p_i) \leq t_i \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_i \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } -42.254 + 1273.3p_i \leq t_i \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_i \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_i \leq (0.0044063 +$$

$0.3622p_1$) $(-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq -17.958 + 479p_1$
かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.4$ かつ $(0.0031223 + 0.26847p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $-25.867 + 664.45p_1 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする。

【0014】なお、さらに望ましくは、上記下部クラッド層と活性層との間にGa_{1-x}N下部ガイド層(膜厚0.08~0.15μm)を有しており、かつ上記上部クラッド層と活性層との間にGa_{1-x}N上部ガイド層(膜厚0.08~0.15μm)を有しており、上記下部クラッド層に介装された上記In_{0.5}Ga_{0.5}N(0 ≤ z ≤ 0.2)緩衝層から上記Ga_{1-x}N上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記In_{0.5}Ga_{0.5}N(0 ≤ z ≤ 0.2)緩衝層から上記Ga_{1-x}N上部ガイド層までの距離をd[μm]、上記In_{0.5}Ga_{0.5}N(0 ≤ z ≤ 0.2)緩衝層から上記Ga_{1-x}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均A₁組成、もしくは上記In_{0.5}Ga_{0.5}N(0 ≤ z ≤ 0.2)緩衝層から上記Ga_{1-x}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均A₁組成を0.08 ≤ x ≤ 0.2とし、上記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁[nm]が、

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.0097376 + 0.69281p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq -6.6349 + 222.72p_1$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.0080268 + 0.58533p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq -8.9956 + 273.95p_1$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(0.0017672 + 0.088604p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $-103.63 + 2403.3p_1 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.4 \leq d < 0.8$ かつ $10 \leq t_1 \leq 1 / (0.006$

$7725 + 0.50578p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.4 \leq d < 0.8$ かつ $10 \leq t_1 \leq -10.86 + 21.88p_1$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.4 \leq d < 0.8$ かつ $1 / (0.0014296 + 0.13014p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.4 \leq d < 0.8$ かつ $-42.254 + 1273.3p_1 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.8$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.0044063 + 0.3622p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.8$ かつ $10 \leq t_1 \leq -17.958 + 479p_1$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.8$ かつ $(0.0031223 + 0.26847p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.8$ かつ $-25.867 + 664.45p_1 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなることがよい。

【0015】〔6〕上記発明において好ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間に0%以上2%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層(膜厚0.08~0.15μm)を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に0%以上2%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層(膜厚0.08~0.15μm)を有しており、下部クラッド層に介装された上記In_{0.5}Ga_{0.5}N(0 ≤ z ≤ 0.2)緩衝層から上記Ga_{1-x}N上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記In_{0.5}Ga_{0.5}N(0 ≤ z ≤ 0.2)緩衝層から上記Ga_{1-x}N上部ガイド層までの距離をd[μm]、上記InGa_{1-x}N上部ガイド層までの距離をd[μm]、上記InGa_{1-x}N緩衝層から上記Ga_{1-x}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均A₁組成、もしくは上記InGa_{1-x}N緩衝層から上記Ga_{1-x}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均A₁組成を0.08 ≤ x ≤ 0.2とし、上記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁[nm]が、
 $d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.002182 + 0.2838p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq -27.916 + 631.14p_1 + 418.94p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

または

$d \geq 0.4$ かつ $(-0.0013694 + 0.16355p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $60.409 - 840.5p_1 + 10843p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.0028147 + 0.32751p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq -24.449 + 560.59p_1 + 222.45p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0011606 + 0.13789p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $81.043 - 1159.4p_1 + 13537p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.0039942 + 0.39645p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq -21.331 + 488.13p_1$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $(-0.00076798 + 0.093666p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $108.61 - 1511.6p_1 + 19016p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする。

【0016】さらに望ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間に0%以上2%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に0%以上2%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、上記InGaN緩衝層から上記上部ガイド層または上記下部ガイド層までの距離をd[μ m]、上記InGaN緩衝層から上記上部ガイド層または上記下部ガイド層までに介装された上部または下部クラッド層の平均Al組成を $0.08 \leq x \leq 0.2$ とし、上記緩衝層の組成 p_1 および膜厚 t_1 [n

m]が、

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 1 / (0.0067725 + 0.50578p_1)$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq -10.86 + 321.88p_1$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.4$ かつ $1 / (0.0014296 + 0.13014p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $-42.254 + 1273.3p_1 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 1 / (0.0080268 + 0.58533p_1)$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq -8.9956 + 273.95p_1$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $1 / (0.00017672 + 0.088604p_1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $-103.63 + 2403.3p_1 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.0097376 + 0.69281p_1)^{(-1)}$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq -6.6349 + 222.72p_1$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなることがよい。

【0017】〔7〕上記発明において好ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間に2%以上4%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に2%以上4%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、上記Al_{x1}Ga_{1-x1}N(0.08 $\leq x_1 \leq 0.2$)下部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N(0 $\leq z \leq 0.2$)緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N(0 $\leq z \leq 0.2$)緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd[μ m]、上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部

クラッド層の平均Al組成、もしくは上記InGa_N緩衝層から上記Ga_N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を $0.08 \leq x \leq 0.2$ とし、上記緩衝層の組成 p_1 および膜厚 t_1 [nm]が、 $d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.00057916 + 0.20257p_1)$ ⁽⁻¹⁾かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 20.248 - 212.49p_1 + 6390p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.4$ かつ $(-0.0025782 + 0.14902p_1)$ ⁽⁻¹⁾ $\leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $345.07 - 6361.6p_1 + 39339p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.000048081 + 0.22812p_1)$ ⁽⁻¹⁾かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 6.7893 + 7.0097p_1 + 4779.4p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0024039 + 0.13561p_1)$ ⁽⁻¹⁾ $\leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $410.2 - 7584.7p_1 + 46101p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.000076166 + 0.27608p_1)$ ⁽⁻¹⁾かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq -4.9294 + 213.76p_1 + 2827.4p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $(-0.0018961 + 0.10494p_1)$ ⁽⁻¹⁾ $\leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $536.08 - 9966.9p_1 + 60707p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする。

【0018】さらに望ましくは、上記下部クラッド層と活性層との間に2%以上4%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層(膜厚 $0.08 \sim 0.15 \mu\text{m}$)を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に2%以上4%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層(膜厚 $0.08 \sim 0.15 \mu\text{m}$)を有しており、上記下部クラッド層に介装された上記 $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から上記Ga_N上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記 $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から上記Ga_N上部ガイド層までの距離を d [μm]、上記InGa_N緩衝層から上記Ga_N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均Al組成、もしくは上記InGa_N緩衝層から上記Ga_N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を $0.08 \leq x \leq 0.2$ とし、上記緩衝層の組成 p_1 および膜厚 t_1 [nm]が、 $d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.002182 + 0.2838p_1)$ ⁽⁻¹⁾かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq -27.916 + 631.14p_1 + 418.94p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.4$ かつ $(-0.0013694 + 0.16355p_1)$ ⁽⁻¹⁾ $\leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $60.409 - 840.5p_1 + 10843p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.0028147 + 0.32751p_1)$ ⁽⁻¹⁾かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq -24.449 + 560.59p_1 + 222.45p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0011606 + 0.13789p_1)$ ⁽⁻¹⁾ $\leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $81.043 - 1159.4p_1 + 13537p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (0.0039942 + 0.39645p_1)$ ⁽⁻¹⁾かつ $t_1 \leq 200$ かつ

19

$$0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq -21.331 + 488.13 p_1 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } (-0.00076798 + 0.093666 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 108.61 - 1511.6 p_1 + 19016 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

のいずれかの範囲に設定してなることがよい。

【0019】〔8〕上記発明において好ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間に4%以上6%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μm）を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に4%以上6%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μm）を有しており、上記下部クラッド層に介装された上記下部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N（0 ≤ z ≤ 0.2）緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N（0 ≤ z ≤ 0.2）緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd [μm]、上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均A1組成、もしくは上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均A1組成を0.08 ≤ x ≤ 0.2とし、上記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁ [nm]が、

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0036588 + 0.15804 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 1192.2 - 22262 p_1 + 112670 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } (-0.0035017 + 0.14571 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 524.75 - 10029 p_1 + 59406 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0029727 + 0.18468 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

20

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 211.87 - 874.3 p_1 + 25752 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } (-0.0033291 + 0.13586 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 587.7 - 11264 p_1 + 66380 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0031947 + 0.21903 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 139.37 - 2496.5 p_1 + 17831 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } (-0.0028237 + 0.11113 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 766.52 - 14773 p_1 + 86589 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

のいずれかの範囲に設定してなることを特徴とする。

【0020】さらに望ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間に4%以上6%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μm）を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に4%以上6%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μm）を有しており、上記下部クラッド層に介装された上記下部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N（0 ≤ z ≤ 0.2）緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N（0 ≤ z ≤ 0.2）緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd [μm]、上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均A1組成、もしくは上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均A1組成を0.08 ≤ x ≤ 0.2とし、上記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁ [nm]が、

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.00057916 + 0.20257 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 20.248 - 212.4$$

21

$9p_1 + 6390p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.4$ かつ $(-0.0025782 + 0.14902p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $345.07 - 6361.6p_1 + 39339p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.000048081 + 0.22812p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 6.7893 + 7.0097p_1 + 4779.4p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0024039 + 0.13561p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $410.2 - 7584.7p_1 + 46101p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.000076166 + 0.27608p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq -4.9294 + 213.76p_1 + 2827.4p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $(-0.0018961 + 0.10494p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $536.08 - 9966.9p_1 + 60707p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなることがよい。

【0021】(9) 上記発明において好ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間に6%以上7%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に6%以上7%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、上記下部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N (0 $\leq z \leq 0.2$)緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層

22

までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N (0 $\leq z \leq 0.2$)緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd [μ m]、上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均Al組成、もしくは上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を0.08 $\leq x \leq 0.2$ とし、上記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁ [nm]が、

10 $d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0036588 + 0.15804p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 1192.2 - 22262p_1 + 112670p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.4$ かつ $(-0.0041761 + 0.13916p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $958.16 - 18852p_1 + 105870p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0038108 + 0.16856p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

30 $0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 973.69 - 8186p_1 + 93321p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0040339 + 0.13236p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $1056.2 - 20815p_1 + 116460p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

40 または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0040773 + 0.19547p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq 539.75 - 10088p_1 + 54757p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

50 $0.2 \leq d < 0.3$ かつ $(-0.0035424 + 0.11285p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1$

$$i \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 1335.8 - 26428 p_1 + 147260 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

のいずれかの範囲に設定してなる。

【0022】なお、さらに望ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間に6%以上7%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μ m）を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に6%以上7%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μ m）を有しており、上記下部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N（0 $\leq z \leq 0.2$ ）緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N（0 $\leq z \leq 0.2$ ）緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd[μ m]、上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均Al組成、もしくは上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を0.08 $\leq x \leq 0.2$ とし、上記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁[nm]が、 $d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0036588 + 0.15804 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 1192.2 - 22262 p_1 + 112670 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } (-0.0035017 + 0.14571 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 524.75 - 10029 p_1 + 59406 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0029727 + 0.18468 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 211.87 - 3874.3 p_1 + 25752 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } (-0.0033291 + 0.13586 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 587.7 - 11264 p_1 + 66380 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

2

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0031947 + 0.21903 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 139.37 - 2496.5 p_1 + 17831 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

10 または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } (-0.0028237 + 0.11113 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 766.52 - 14773 p_1 + 86589 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

のいずれかの範囲に設定してなることがよい。

【0023】〔10〕上記発明において好ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間に7%以上10%以下のInを少なくとも含む下部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μ m）を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に7%以上10%以下のInを少なくとも含む上部ガイド層（膜厚0.08~0.15 μ m）を有しており、上記下部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N（0 $\leq z \leq 0.2$ ）緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N（0 $\leq z \leq 0.2$ ）緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までの距離をd[μ m]、上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均Al組成、もしくは上記InGa_{1-z}N緩衝層から上記Ga_{1-z}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を0.08 $\leq x \leq 0.2$ とし、上記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁[nm]が、 $d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.004347 + 0.14719 p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

40 または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 858.55 - 16866 p_1 + 95186 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } (-0.005134 + 0.1362 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 2497.8 - 49961 p_1 + 264020 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$50 \quad 0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0044$$

$872 + 0.15446 p_1$ $(-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ
 $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 780$, $25 - 15299 p_1 + 86683 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0049851 + 0.13106 p_1) (-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $2705.9 - 54159 p_1 + 285760 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0048885 + 0.17591 p_1) (-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq 597.65 - 11661 p_1 + 66983 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $(-0.0044282 + 0.11446 p_1) (-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $3324.9 - 66656 p_1 + 351050 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなる。

【0024】なお、さらに望ましくは、上記下部クラッド層と活性層の間に7%以上8%未満のInを少なくとも含む下部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に7%以上8%未満のInを少なくとも含む上部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、上記下部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N (0 $\leq z \leq$ 0.2)緩衝層から上記Ga_{1-x}N上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記In_zGa_{1-z}N (0 $\leq z \leq$ 0.2)緩衝層から上記Ga_{1-x}N上部ガイド層までの距離をd [μ m]、上記InGa_{1-x}N緩衝層から上記Ga_{1-x}N下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均Al組成、もしくは上記InGa_{1-x}N緩衝層から上記Ga_{1-x}N上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均Al組成を0.08 $\leq x \leq$ 0.2とし、上記緩衝層の組成p₁および膜厚t₁ [nm]が、 $d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0036588 + 0.15804 p_1) (-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$d \geq 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 1192.2 - 22262 p_1 + 112670 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$d \geq 0.4$ かつ $(-0.0041761 + 0.13916 p_1) (-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

10 $d \geq 0.4$ かつ $958.16 - 18852 p_1 + 105870 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0038108 + 0.16856 p_1) (-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $10 \leq t_1 \leq 973.69 - 8186 p_1 + 93321 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

20 または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $(-0.0040339 + 0.13236 p_1) (-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.3 \leq d < 0.4$ かつ $1056.2 - 20815 p_1 + 116460 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

30 $0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq (-0.0040773 + 0.19547 p_1) (-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $10 \leq t_1 \leq 539.75 - 10088 p_1 + 54757 p_1^2$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $(-0.0035424 + 0.11285 p_1) (-1) \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

40 または

$0.2 \leq d < 0.3$ かつ $1335.8 - 26428 p_1 + 147260 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

のいずれかの範囲に設定してなるか、もしくは、上記下部クラッド層と活性層の間に8%以上10%以下のInを少なくとも含む下部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有しており、かつ上部クラッド層と活性層との間に8%以上10%以下のInを少なくとも含む上部ガイド層(膜厚0.08~0.15 μ m)を有してお

50 り、上記下部クラッド層に介装された上記下部クラッド

層に介装された上記 $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から上記 GaN 上部ガイド層までの距離、もしくは上記上部クラッド層に介装された上記 $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ ($0 \leq z \leq 0.2$) 緩衝層から上記 GaN 上部ガイド層までの距離を d [μm]、上記 InGaN 緩衝層から上記 GaN 下部ガイド層までに介装された下部クラッド層の平均 Al 組成、もしくは上記 InGaN 緩衝層から上記 GaN 上部ガイド層までに介装された上部クラッド層の平均 Al 組成を $0.08 \leq x \leq 0.2$ とし、上記緩衝層の組成 p_1 および膜厚 t_1 [nm] が、

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.004347 + 0.14719p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 858.55 - 16866p_1 + 95186p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } (-0.005134 + 0.1362p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$d \geq 0.4 \text{ かつ } 2497.8 - 49961p_1 + 264020p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0044872 + 0.15446p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 780.25 - 5299p_1 + 86683p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } (-0.0049851 + 0.13106p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.3 \leq d < 0.4 \text{ かつ } 2705.9 - 54159p_1 + 285760p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (-0.0048885 + 0.17591p_1)^{(-1)} \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq 597.65 - 16661p_1 + 66983p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } (-0.0044282 + 0.11446p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

$$1 \leq 0.09$$

または

$$0.2 \leq d < 0.3 \text{ かつ } 3324.9 - 66656p_1 + 351050p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

のいずれかの範囲に設定してなることがよい。

【0025】【11】さらに、上記発明において好ましくは、上記下部クラッド層と、基板との間に、0%以上20%以下の In を少なくとも含む $\text{In}_r\text{Ga}_{1-r}\text{N}$ 緩衝層が、少なくとも1層介装されている。

【0026】【12】本発明に基づく光学式情報再生装置は、情報記録面を有する光ディスクに照射されたレーザ光の反射光を光変換することにより、該光ディスクに記録された記録情報を再生する光学式情報再生装置であって、上述のいずれかの半導体レーザ素子を光源として用いることを特徴とする。

【0027】なお、本明細書において、 x 軸は半導体層面に対し、垂直方向にとるものとする。 κ は、モード I とモード II の結合係数である。また λ は真空中における発振波長、 $\omega (=2\pi c/\lambda)$ 、 c は真空中の光速) は発振角周波数、 ϵ_0 は真空中の誘電率を表す。 μ_0 は真空中の透磁率を表すものとする。 κ の計算式における積分範囲は、 n 型 InGaN 緩衝層内とする。また、 $f_{eq}(x)$ 、 $f_i(x)$ は、それぞれ以下の規格化条件 $(n_{eq}/2/\omega/\mu_0) \int |f_{eq}(x)|^2 dx = 1$ $(n_i/2/\omega/\mu_0) \int |f_i(x)|^2 dx = 1$ を満たすものとする。但し、積分範囲は、負の無限大から正の無限大までである。

【0028】

【発明の実施の形態】図1～図18は、本発明の実施の形態を説明するための図である。以下に、本発明の実施の形態を説明する。

【0029】図1は、本発明の半導体レーザ素子を示す模式図である。図は、半導体レーザの導波路部分の共振器に垂直な断面を示している。本半導体レーザ素子は、

(0001) C面サファイア基板1 (膜厚30～300 μm)、 GaN 低温バッファ層2 (膜厚0～100 nm)、 n 型 GaN コンタクト層3 (膜厚0.1～10 μm)、 n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.08 \leq x \leq 0.2$) クラッド層4 (膜厚0.2～0.8 μm) と n 型 $\text{In}_p\text{Ga}_{1-p}\text{N}$ ($0 < p \leq 0.2$) 緩衝層5 (膜厚10～200 nm) との交互多層構造 (n 型クラッド層/ n 型緩衝層/ \dots / n 型緩衝層/ n 型クラッド層) からなる n 型 AlGaInN クラッド層15 (総膜厚0.8～10 μm)、 n 型 $\text{In}_s\text{Ga}_{1-s}\text{N}$ ($0 \leq s \leq 0.1$) ガイド層6 (膜厚0.08～0.15 μm)、 $\text{In}_w\text{Ga}_{1-w}\text{N}$ ($0 < w < 0.2$) 井戸層と $\text{In}_v\text{Ga}_{1-v}\text{N}$ ($0 < v < w$) 障壁層との交互多層構造 (障壁層/井戸層/ \dots /井戸層/障壁層) からなる多重量子井戸活性層7 (発光波長370～430 nm 、総膜厚5～60 nm)、 p

型 $\text{Al}_{1-z}\text{Ga}_z\text{N}$ ($0 \leq z \leq 0.3$) キャリアブロック層8 (膜厚 $0 \sim 20 \text{ nm}$)、p型 $\text{In}_{1-t}\text{Ga}_t\text{N}$ ($0 \leq t \leq 0.1$) ガイド層9 (膜厚 $0.08 \sim 0.15 \mu\text{m}$)、p型 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($0.08 \leq y \leq 0.2$) クラッド層10 (膜厚 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$)、p型 GaN コンタクト層11 (膜厚 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$) の各窒化物系半導体層が形成されている。

【0030】その上には、必要な形状の絶縁膜12が、メサ上の概略全面に形成されている。正電極13 (たとえば、 Pd/Au 、 $\text{Ni}/\text{Pd}/\text{Au}$ 、 $\text{Pd}/\text{Pt}/\text{Au}$ 等) は、p型 GaN コンタクト層の一部露出した面上の全面を含む、メサ状の概略全面に形成されている。負電極14 (たとえば、 Ti/Al 、 Zr/Al 、 Hf/Al など) は、n型 GaN コンタクト層の一部露出した面上に形成されている。メサは、n型 GaN コンタクト層、n型 InGaInN クラッド層、n型 InGaInN 緩衝層、n型 AlGaInN クラッド層、n型 GaInN ガイド層、 InGaInN 多重量子井戸活性層、p型 AlGaInN キャリアブロック層、p型 AlGaInN クラッド層、p型 GaInN コンタクト層、絶縁膜 (但し前記絶縁膜は必要領域のみ)、正電極より構成されている。ストライプの両端面はミラーとして働き、光共振器を構成している。

【0031】次に、本実施の形態における半導体レーザの製造方法について述べる。まず、(0001) C面サファイア基板 (膜厚 $30 \sim 300 \mu\text{m}$) を洗浄する。洗浄した(0001) C面サファイア基板をMOCVD装置内に導入し、 H_2 雰囲気の中で、約 1100°C の高温でクリーニングを行う。その後、降温して、キャリアガスとして水素 (H_2) を $10 \text{ リットル}/\text{min}$ 流しながら、 600°C で NH_3 とトリメチルガリウム (TMG) をそれぞれ $5 \text{ リットル}/\text{min}$ 、 $20 \text{ mol}/\text{min}$ 導入して、 $0 \sim 100 \text{ nm}$ の厚みの GaInN 低温バッファ層を成長する。低温バッファ層としては、 GaInN に限らず、トリメチルアルミニウム (TMA)、TMG、 NH_3 を使用して、 AlInN 膜や GaAlInN 膜を用いてもなんら影響はない。

【0032】次に、 N_2 と NH_3 をそれぞれ $5 \text{ リットル}/\text{min}$ 流しながら約 1050°C まで昇温する。温度が上がれば、キャリアガスを N_2 から H_2 に代えて、TMGを $100 \mu\text{mol}/\text{min}$ 、 SiH_4 を $10 \text{ nmol}/\text{min}$ 導入して、n型 GaInN コンタクト層を $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 成長する。次に、TMGの流量を $50 \mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、TMAを一定量導入して、n型の $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{InN}$ ($0.08 \leq x \leq 0.2$) クラッド層を $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ の厚さで成長する。次に、TMGおよびTMAの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、約 800°C まで降温後、TMGを $15 \mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、TMIを一定量流しながら、 $\text{In}_p\text{Ga}_{1-p}\text{N}$ ($0 < p \leq 0.2$) 緩衝層を $0 \sim 200 \text{ nm}$ 成長する。

【0033】次に、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び 1050°C まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に代えて、TMGの流量を $50 \mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、TMAを一定量導入して、n型の $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{InN}$ ($0.08 \leq x \leq 0.2$) クラッド層を $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ の厚さで成長する。このn型 AlGaInN 層とn型 InGaInN 層とを繰り返し成長し、n型 AlGaInN 緩衝層とn型 InGaInN 緩衝層との交互多層構造 (n型クラッド層/n型緩衝層/.../n型緩衝層/n型クラッド層) からなるn型 AlGaInN クラッド層を総膜厚 $0.8 \sim 10 \mu\text{m}$ 成長する。 AlGaInN の成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGを $100 \mu\text{mol}/\text{min}$ に調整して、n型 GaInN ガイド層を $0.08 \sim 0.15 \mu\text{m}$ の厚さになるように成長する。

【0034】その後、TMGの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、 700°C まで降温し、インジウム原料であるトリメチルインジウム (TMI) を一定量、TMGを $15 \mu\text{mol}/\text{min}$ 導入し、 $\text{In}_v\text{Ga}_{1-v}\text{N}$ よりなる障壁層を成長する。その後、TMIの供給をある一定量にまで増加し、 $\text{In}_w\text{Ga}_{1-w}\text{N}$ よりなる井戸層を成長する。この InGaInN 障壁層と InGaInN 井戸層との交互多層構造 (障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層) からなる多重量子井戸 (MQW) 活性層を成長する。障壁層および井戸層を形成する InGaInN の混晶比及び膜厚は、発光波長が $370 \sim 430 \text{ nm}$ の範囲になるように設計し、成長時に導入するTMIの流量は、その設計値に等しいIn組成の膜が得られるように調節する。MQW活性層の成長が終了すると、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び 1050°C まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に代えて、TMGを $50 \mu\text{mol}/\text{min}$ 、TMAを適量、p型ドーピング原料であるビスシクロペンタジエニルマグネシウム (Cp_2Mg) を $10 \text{ nmol}/\text{min}$ 流し、 $0 \sim 20 \text{ nm}$ 厚のp型 $\text{Al}_{1-z}\text{Ga}_z\text{N}$ ($0 \leq z \leq 0.3$) キャリアブロック層を成長する。

【0035】キャリアブロック層の成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGの供給量を $100 \mu\text{mol}/\text{min}$ に調整して、 $0.08 \sim 0.15 \mu\text{m}$ の厚さのp型 GaInN ガイド層を成長する。その後、TMGの供給を $50 \mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、TMAを一定量導入し、 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 厚のp型 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($0.08 \leq y \leq 0.2$) クラッド層を成長し、最後に、TMGの供給を $100 \mu\text{mol}/\text{min}$ に調整して、TMAの供給を停止し、 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 厚のp型 GaInN コンタクト層の成長を行い発光素子構造の成長を終了する。成長が終了すると、TMGおよび Cp_2Mg の供給を停止して降温し、室温でMOCVD装置より取り出す。

【0036】本レーザ構造を有する膜の最表面 (成長終

端面)の表面粗さの平均値(Ra)は約10nmであり、大変良好な平坦性を示した。また、(0001)C面サファイア基板、Ga_{0.9}N低温バッファ層、n型Ga_{0.9}Nコンタクト層、n型AlGa_{0.1}Nクラッド層とn型InGa_{0.49}N緩衝層との交互多層構造(n型クラッド層/n型緩衝層/.../n型緩衝層/n型クラッド層)からなるn型AlGaInNクラッド層(層膜厚約1μm)で構成された構造を有するウェハを複数枚作製し、表面を光学顕微鏡で約200倍に拡大して観察したところ、全てのウェハにおいて六角形のクラックはほとんど確認されなかった。より具体的には、10枚のウェハの内ウェハの周辺で六角形のクラックが発生しているウェハは1枚だけであった。従来の技術における課題が解消されたのは、Inを含む緩衝層を介装してn型AlGa_{0.1}Nクラッド層を多段成長したことによる効果に他ならない。

【0037】その後、フォトリソグラフィ技術および反応性イオンエッチング技術を用い、p型Ga_{0.9}Nコンタクト層を3μm幅のストライプ状に残して、p型Al_{0.1}Ga_{0.9}In_{0.1}N(0.08≤y≤0.2)クラッド層までエッチングを行い、光導波路を形成した後、フォトリソグラフィ技術を用いてp型Ga_{0.9}Nコンタクト層が電極と接触する部分を除いて絶縁膜を形成する。その後、反応性イオンエッチング技術を用いて、ウェハ最表面よりn型Ga_{0.9}Nコンタクト層の途中まで、負電極を形成する部分を除去する。その後、メサ状のp型Ga_{0.9}Nコンタクト層の一部露出した面上に、正電極を形成する。電極材料としては、たとえばAu/NiあるいはAu/Pdを用いれば良い。また、n型Ga_{0.9}Nコンタクト層の一部露出した面上の概略全面に、負電極を形成する。負電極材料としては、たとえばAl/TiあるいはAu/Wを用いれば良い。

【0038】最後に劈開あるいはドライエッチング法を用いて素子長が約0.5mmとなるようにして、ミラーとなる端面を形成した。

【0039】以上により、図1に示す窒素化合物半導体を用いた青紫色の発光波長を有するレーザが作製できる。

【0040】本半導体レーザ素子において、n型AlGaInNクラッド層中に介装される単層または複数層からなるn型InGa_{0.49}N緩衝層の膜厚およびIn混晶比は、レーザ発振モードが各n型InGa_{0.49}N緩衝層と、その近隣層であるn型AlGa_{0.1}Nクラッド層で構成される3層スラブ導波路に結合しない条件となるように設計されている。

【0041】AlGa_{0.1}Nクラッド層中の緩衝層としてInGa_{0.49}Nを用いると、AlGa_{0.1}Nクラッド/InGa_{0.49}N/AlGa_{0.1}Nクラッドで3層スラブ導波路が構成されるので、レーザ発振モードが前記3層スラブ導波路に結合するという新たな問題が発生する。レーザ発振モードが

前記n型InGa_{0.49}N緩衝層へ結合すると、レーザ発振モードの活性層への閉じ込め率の低下を招き、閾値電流密度の上昇を生ずる。さらに、n型Ga_{0.9}Nコンタクト層へのモードの染み出しが大きくなり、n型Ga_{0.9}Nコンタクト層におけるレーザ発振モードの電界振幅が大きくなる。これは、FFP(ファーフールドパターン)におけるリップルを生ずる原因となり、このような半導体レーザを光ピックアップなどの光学再生装置の光源として使用した場合、集光点におけるプロファイルの乱れや集光点径の拡大といった問題を生ずる原因となり、光ディスク等への記録密度の低下を招くことになる。

【0042】これらの問題は、介装されるn型InGa_{0.49}N緩衝層の膜厚およびIn組成を適正に設定することにより回避されるものである。

【0043】以下、まずn型AlGaInNクラッド層中に一層のみ介装されるn型InGa_{0.49}N緩衝層へのレーザ発振モードの結合を抑制する条件について述べる。n型AlGaInNクラッド層中にn型InGa_{0.49}N緩衝層が複数介装される場合、およびp型AlGaInNクラッド層中にp型InGa_{0.49}N緩衝層が複数介装される場合は、個々の緩衝層が、以下に述べる条件を満たすことを考えれば良い。

【0044】n型AlGa_{0.1}Nクラッド層(膜厚は無有限大)/n型Ga_{0.9}Nガイド層/InGa_{0.49}N多重量子井戸活性層/p型AlGa_{0.1}Nキャリアストップ層/p型Ga_{0.9}Nガイド層/p型AlGa_{0.1}Nクラッド層(膜厚は無有限大)で構成される多層スラブ導波路に生じる導波モード(価屈折率 n_{eq} 、電界振幅 $f_{eq}(x)$)をここではモードIと呼ぶことにする。本明細書においては、活性層を含み、p型/n型クラッド層に挟まれた層構造を、半導体レーザ素子の発振光の導波層と呼んでいる。本実施の形態においては、n型Ga_{0.9}Nガイド層からp型Ga_{0.9}Nガイド層までの多層構造が、半導体レーザ素子の発振光の導波層となっている。また、n型AlGa_{0.1}Nクラッド層(膜厚は無有限大)/n型InGa_{0.49}N緩衝層/n型AlGa_{0.1}Nクラッド層(膜厚は無有限大)で構成される3層スラブ導波路に生じる導波モード(等価屈折率 n_i 、電界振幅 $f_i(x)$)をここではモードIIと呼ぶことにする。通常のモード結合理論よりモードIからモードIIへ移行する光波パワーの最大移行率(全導波光パワーを1としたとき、励振されるモードIIの最大強度の相対値)は、

$$F = 1 / \{ 1 + (\Delta / \kappa)^2 \}$$

$$\text{但し } \Delta = (\pi / \lambda) (n_{eq} - n_i)$$

$$\kappa = (\omega \cdot \epsilon_0 / 4) \int \{ f_{eq}(x) \cdot \delta \epsilon(x) \cdot f_i(x) \} dx$$

$$\delta \epsilon(x) = \epsilon_i - \epsilon_A, \quad 0$$

$$\epsilon_i; \text{ n型AlGa_{0.1}Nクラッド層の誘電率}$$

$$\epsilon_A; \text{ n型InGa_{0.49}N緩衝層の誘電率}$$

で与えられる。ここでx軸は、半導体層面に対し、垂直

方向にとっている。 $f_{eq}(x)$ 、 $f_i(x)$ の引数である位置 x は、両関数で共通とする。即ち、 n 型InGaN緩衝層とGaInガイド層との距離は、実際の半導体レーザ素子構造におけるそれと同一とする。 κ は、モードIとモードIIの結合係数である。上式中における積分は、 n 型InGaN緩衝層内厚さ方向に渡って行うものとし、本明細書中における積分記号は、全て同様に行うものとする。また、 $f_{eq}(x)$ 、 $f_i(x)$ は、それぞれ以下の規格化条件

$$\begin{aligned} (n_{eq}/2/\omega/\mu_0) \int |f_{eq}(x)|^2 dx &= 1 \\ (n_i/2/\omega/\mu_0) \int |f_i(x)|^2 dx &= 1 \end{aligned} \quad 10$$

を満たすものとする。

【0045】なお、モードIとしては、複数のモードが存在する場合があるが、実際にレーザ発振を起こすモード（活性層の光分布が最大となるモード）を選ぶこととする。本明細書では、これを単に、レーザ素子の発振光の導波モードと呼んでいる。

【0046】またなお、モードIIとしては、複数のモードが存在する場合があるが、その場合は最高次のモードを選ぶこととする。

【0047】等価屈折率 n_{eq} 、 n_i 、および導波モードの電界分布 $f_{eq}(x)$ 、 $f_i(x)$ は、スラブ導波路における通常の電界分布計算により求めることができ、たとえば、ジャーナル・オブ・アプライド・フィジックス84号1196から1203ページ (M. J. Bergmann and H. C. Casey, Jr.: J. Appl. Phys. vol. 84 (1998) pp. 1196-1203) を参照することができる。また、電界分布計算におけるパラメータである、発振波長 λ [nm]における各材料の屈折率 n は、次により、求められる。発振波長 λ は300~800nmの範囲とすることができる。

【0048】まず、各材料のパラメータ E_g [eV]が次式で与えられる。In_sGa_{1-s}N ($0 \leq s \leq 1$) に対しては、

$$E_g = E_{g1}[s] = 3.42(1-s) + 2.65s - 3.94s(1-s)$$

Al_tGa_{1-t}N ($0 \leq t \leq 1$) に対しては、

$$E_g = E_{g2}[t] = 3.42(1-t) + 6.2t - 1.057t(1-t)$$

In_sAl_tGa_{1-s-t}N ($0 < s < 1$, $0 < t < 1$) に対しては、

$$E_g = \{s E_{g1}[s+t] + t E_{g2}[s+t]\} / (s+t)$$

これにより、屈折率は、

$$p[\lambda] = 1 / [1/\lambda - (E_g - 3.42) / 1239.852]$$

とにおいて、 $p[\lambda] > 360.7$ のとき、

$$n(p[\lambda]) = [4.3663801 + p^2 / (p^2 - 295.92)]^{0.5}$$

$p[\lambda] \leq 360.7$ のとき、

$$n(p[\lambda]) = c_0 + c_1 p + c_2 p^2 + c_3 p^3 + \dots \quad 50$$

$$c_4 p^4$$

$$q = p[\lambda] - 360$$

$$c_0 = 2.718$$

$$c_1 = 9.976 \times 10^{-3}$$

$$c_2 = 3.005 \times 10^{-4}$$

$$c_3 = 4.584 \times 10^{-6}$$

$$c_4 = 2.596 \times 10^{-8}$$

である。本発明において、等価屈折率(n_{eq} 、 n_i 、 \dots)および電界分布($f_{eq}(x)$ 、 $f_i(x)$ 、 \dots)はここに規定されたパラメータを用い、上述のとおり、スラブ導波路における電界分布計算により計算されるものである。

【0049】図2は、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数の相対値と、上記Fなるパラメータとの相関を示したものである。活性層閉じ込め係数の相対値は、 $F=0$ の時 (AlGaInNクラッド層が、InGaInN緩衝層を含まないAlGaInNで構成された時) における活性層閉じ込め係数の値を1と置いたときの相対値を表している。実線21は、 n 型InGaInN緩衝層のIn混晶比を固定し、Fが0から1に変化するまで n 型InGaInN緩衝層の膜厚を0nmから増加させ、このときの活性層閉じ込め係数相対値の変化を表している。破線23は、 n 型InGaInN緩衝層の膜厚を固定し、Fが0から1に変化するまで n 型InGaInN緩衝層のIn混晶比を0から増加させ、このときの活性層閉じ込め係数相対値の変化を表している。実線21と破線23を比較すると、極めてよい一致を示しており、InGaInN緩衝層の膜厚およびIn混晶比のいずれを変化させてもFに与える影響は等しいことを表している。図より、

$$F < 0.4 \quad \dots \dots \dots (1) \quad 30$$

のとき、レーザ発振モードの閉じ込め係数は、InGaInN緩衝層が無い構造のときの9割以上と十分大きな値となり、またこのとき良好なFFPを生ずる事が示される。

【0050】また、図において実線22は、 n 型InGaInN緩衝層のIn混晶比を固定し、Fが1の状態からさらに n 型InGaInN緩衝層の膜厚を増加させ、このときの活性層閉じ込め係数相対値の変化を表している。このとき、Fは1から減少し、活性層閉じ込め係数の相対値は増加傾向を示す。破線24は、 n 型InGaInN緩衝層の膜厚を固定し、Fが1の状態からさらに n 型InGaInN緩衝層のIn混晶比を増加させ、このときの活性層閉じ込め係数相対値の変化を表している。実線22と破線24を比較すると極めてよい一致を示しており、InGaInN緩衝層の膜厚およびIn混晶比のいずれを変化させてもFに与える影響は等しいことを表している。

【0051】実線22は、実線21より上に位置しており、Fが0.4より大きな値においても活性層閉じ込め係数の相対値が9割以上となりうるが、FFPに多数のリップルを生じやすい。このリップルが無視できるほど

小さくなるのは、やはり F が0.4以下のときであることが示される。

【0052】結局、(1)式を満たすように半導体レーザ素子の層構造を設計し、作製すれば、レーザ発振モードのInGa N 緩衝層への結合を無視できるほど抑制することができ、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数を大きくとることができ、また良好なFFPが得られるようになる。

【0053】また、図2の関係は、活性層の発光波長が370～430nmの範囲で変化しても、また全ての半導体成長層の混晶比および膜厚が所定の範囲で変化しても、ほとんど変わらなかった。

【0054】(1)式が成り立つ時、 n_{eq} および $f_{eq}(x)$ はそれぞれレーザ発振モードの等価屈折率および電界分布に近い値となるので、(1)を計算する際に用いる n_{eq} および $f_{eq}(x)$ は、それぞれレーザ発振モードの等価屈折率および電界分布を用いても良い。

【0055】図3(a)、(b)は、レーザ発振モードの電界分布を表しており、図3(a)は $F < 0.4$ の場合の例であり、図3(b)は $F > 0.4$ の場合の例を示しており、図3(a)は $F = 0.3$ 、図3(b)は $F = 0.5$ の場合を示している。図において、横軸は基板面に対し垂直方向における位置を表しており、縦軸は電界振幅の強度を表している。横軸の単位は μm であり、原点位置は特に意味がない。縦軸は、任意単位である。

【0056】また、縦線31はn型AlGa N クラッド層/n型Ga N ガイド層/InGa N 多重量子井戸活性層/p型AlGa N キャリアストップ層/p型Ga N ガイド層/p型AlGa N クラッド層で構成される多層スラブ導波路の位置を表しており、簡単のため、n型AlGa N クラッド層/n型Ga N ガイド層境界の位置およびp型Ga N ガイド層/p型AlGa N クラッド層境界の位置のみを表している。また、縦線32はn型AlGa N クラッド層/n型InGa N 緩衝層/n型AlGa N クラッド層で構成される3層スラブ導波路の位置を表しており、n型AlGa N クラッド層/n型InGa N 緩衝層境界の位置およびn型InGa N 緩衝層/n型AlGa N クラッド層境界の位置を示している。また、電界振幅強度の大きさは、最大値が1となるように規格化して示している。

【0057】図3(a)においては、レーザ発振モードのInGa N 緩衝層における電界振幅強度が十分小さく押さえられており、レーザ発振モードがInGa N 緩衝層をコアとする導波路への結合が十分抑制されている。これに対し、図3(b)においては、レーザ発振モードのInGa N 緩衝層における電界振幅強度が大きくなっており、レーザ発振モードのInGa N 緩衝層をコアとする導波路への結合が強く生じている。

【0058】図3(a)、(b)より、InGa N 緩衝層における電界振幅の強度を十分小さくするためには、

(1)式を満たすように半導体レーザ素子の層構造を設計し、作製すれば、レーザ発振モードのInGa N 緩衝層への結合を無視できるほど小さく抑制できることが判る。

【0059】 F の値が(1)式の条件を満たすように変更できるかどうか、本発明者らが種々検討した結果、InGa N 緩衝層を特定の組成・膜厚のInGa N とすれば、達成できることを見出した。

【0060】InGa N 緩衝層が、n型AlGa N クラッド層内に複数存在する場合には、導波モードの電界分布($f_{eq}(x)$)および等価屈折率(n_{eq})と、各InGa N 緩衝層において生ずる導波モードの電界分布($f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 \dots 、 $f_i(x)$ 、 \dots)および等価屈折率(n_1 、 n_2 、 \dots 、 n_i 、 \dots)とで決定される F_1 、 F_2 、 \dots 、 F_i 、 \dots のうち、 $F_i < 0.4$ を満たす層が存在するとき、そのInGa N 緩衝層へのモード結合による影響は無視できるほど小さくなる。n型AlGa N クラッド層内に存在するInGa N 緩衝層のうち、上記条件を満たす層が少なくとも1層あれば、FFPにおけるリップルの抑制、および活性層への閉じ込め係数の向上という効果が発生する。

【0061】また、(1)式の条件を満たすInGa N 緩衝層が、p型AlGa N クラッド層内に単数または複数存在する、p型AlGa N クラッド層を有する半導体レーザ素子も、本発明の請求範囲である。この場合は、p型AlGa N クラッド層を、InGa N 緩衝層を介して多段に成長することが可能となる。これは、レーザ発振モードの正電極における吸収を抑制でき、閾値電流密度を低減できるという効果が発生する。

【0062】また、p型AlGa N クラッド層を厚膜としたことにより、p型Ga N コンタクト層におけるレーザ発振モードの電界振幅を抑制できるため、p型Ga N コンタクト層を厚膜とすることができる。n型Ga N コンタクト層が厚く、p型Ga N コンタクト層が薄い場合は、半導体レーザ素子の共振器を構成するミラーとなる端面を劈開により作製した際、活性層近傍におけるミラー端面が半導体層に対し垂直となりにくい性質があるが、p型Ga N コンタクト層厚をn型Ga N コンタクト層と同程度に厚膜とすることにより、活性層近傍におけるミラー端面を半導体層に対し垂直にできるという効果が発生する。

【0063】また、p型Ga N コンタクト層を厚膜とすれば、半導体レーザ素子を半導体成長面側とサブマウントが向き合うようにダイボンドできるようになり、半導体レーザ素子の発振時に生ずる熱の放出が容易となり、半導体レーザ素子の特性向上という効果が発生する。しかし、p型Ga N コンタクト層が0.5 μm 以下と薄い半導体レーザ素子を半導体成長面側とサブマウントが向き合うようにダイボンドすると、半導体レーザとサブマ

ーザ素子の側面を登ってくるため、半導体レーザ素子のp型半導体層とn型半導体層が短絡することにより半導体レーザ素子の不良を招きやすい。しかし、p型GaNコンタクト層を厚膜化することにより、半導体レーザ素子の不良を抑制することができるようになるという効果が発生する。

【0064】また、p型クラッド層内ないしn型クラッド層内に介装されるInGaN緩衝層は、層内で一定の混晶比や膜厚でなくてもよい。その場合は、混晶比の平均値および膜厚の平均値が、(1)式を満たす範囲に決定されてい

ばよい。
【0065】また、p型クラッド層内ないしn型クラッド層内に介装されるInGaN緩衝層における吸収は、レーザ発振モードの吸収を引き起こし、閾値電流密度の増加を招くため、InGaN緩衝層における吸収係数は、小さい方がより望ましい。

【0066】また、半導体レーザ素子に用いられる基板は、サファイアを用いたが、他の基板でも良く、たとえばGaN基板でもよい。この場合、AlGaNクラッド層中に介装されるInGaN緩衝層の混晶比および膜厚が満たすべき条件の範囲は、サファイア基板の場合と同じであった。

【0067】本条件を満たす範囲で、半導体レーザ素子を作製したところ、発振を生ずる素子の数は、従来の半導体レーザ素子に比べて多かった。より具体的には、レーザ発振を生ずる半導体レーザ素子の割合は、30個中25個の割合であり、従来の半導体レーザ素子に比べて歩留まりが向上した。また、従来の半導体レーザ素子で、正常にレーザ発振を生ずる素子における閾値電流密度よりも、本発明の半導体レーザにおける閾値電流密度の方が低かった。より具体的には、 $1 \sim 2 \text{ kA/cm}^2$ で発振した。これは、n型InGaN緩衝層を介してn型AlGaNクラッド層を成長したことで、活性層を成長する下地の結晶性が改善したことにより、結果として活性層の結晶性が向上したこと、またレーザ発振モードのn型InGaN緩衝層への結合が抑制されていることが主な理由である。また、従来の半導体レーザは、連続して10時間以上発振を継続させていると、光出力が急激に低下する現象が生じてきたが、n型AlGaNクラッド層中にn型InGaN緩衝層を挿入した本実施例に示すレーザは、約1000時間経過しても、特性の変化は見られなかった。また、本発明の半導体レーザ素子のレーザ発振モードはリップルのないFFPを示し、良好な光学特性を示した。

【0068】(実施の形態1)図4は、本発明の第1の実施の形態を示す半導体レーザ素子の模式図である。図は、半導体レーザの導波路部分の共振器に垂直な断面を示している。本半導体レーザ素子は、(0001)C面サファイア基板1(膜厚 $30 \sim 300 \mu\text{m}$)、GaN低温バッファ層2(膜厚 $0 \sim 100 \text{ nm}$)、n型GaNコ

ンタクト層3(膜厚 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$)、n型 $\text{In}_r\text{Ga}_{1-r}\text{N}$ ($0 \leq r \leq 0.2$)緩衝層41(膜厚 $0 \sim 200 \text{ nm}$)、n型 $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ ($0.08 \leq x1 \leq 0.2$)クラッド層4(膜厚 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$)とn型 $\text{In}_{p1}\text{Ga}_{1-p1}\text{N}$ ($0.001 \leq p1 \leq 0.2$)緩衝層5(膜厚 $10 \sim 200 \text{ nm}$)とn型 $\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ ($0.08 \leq x2 \leq 0.2$)クラッド層4(膜厚 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$)からなるn型AlGaNクラッド層15(総膜厚 $0.8 \sim 10 \mu\text{m}$)、n型GaNガイド層6(膜厚 $0.08 \sim 0.15 \mu\text{m}$)、 $\text{In}_w\text{Ga}_{1-w}\text{N}$ ($0 < w < 0.2$)井戸層と $\text{In}_v\text{Ga}_{1-v}\text{N}$ ($0 < v < w$)障壁層との交互多層構造(障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層)からなる多重量子井戸活性層7(発光波長 $370 \sim 430 \text{ nm}$ 、総膜厚 $5 \sim 60 \text{ nm}$)、p型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ ($0 \leq z \leq 0.3$)キャリアブロック層8(膜厚 $0 \sim 20 \text{ nm}$)、p型GaNガイド層9(膜厚 $0.08 \sim 0.15 \mu\text{m}$)、p型 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($0.08 \leq y \leq 0.2$)クラッド層10(膜厚 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$)、p型GaNコンタクト層11(膜厚 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$)の各窒化物系半導体層が形成されている。

【0069】その上には、必要な形状の絶縁膜12が、メサ上の概略全面に形成されている。正電極13(たとえば、Pd/Au、Ni/Pd/Au、Pd/Pt/Au等)は、p型GaNコンタクト層の一部露出した面上の全面を含む、メサ状の概略全面に形成されている。負電極14(たとえば、Ti/Al、Zr/Al、Hf/Alなど)は、n型GaNコンタクト層の一部露出した面上に形成されている。メサは、n型GaNコンタクト層、n型InGaN緩衝層、n型AlGaNクラッド層、n型GaNガイド層、InGaN多重量子井戸活性層、p型AlGaNキャリアブロック層、p型GaNガイド層、p型AlGaNクラッド層、p型GaNコンタクト層、絶縁膜(但し前記絶縁膜は必要領域のみ)、正電極より構成されている。ストライプの両端面はミラーとして働き、光共振器を構成している。

【0070】次に、本実施の形態における半導体レーザの製造方法について述べる。まず、(0001)C面サファイア基板を洗浄する。洗浄した(0001)C面サファイア基板をMOCVD装置内に導入し、 H_2 雰囲気の中で、約 1100°C の高温でクリーニングを行う。その後、降温して、キャリアガスとして水素(H_2)を 10 リットル/分 流しながら、 600°C で NH_3 とトリメチルガリウム(TMG)をそれぞれ 5 リットル/分 、 20 mol/分 導入して、 $0 \sim 100 \text{ nm}$ (たとえば約 20 nm)の厚みのGaN低温バッファ層を成長する。低温バッファ層としては、GaNに限らず、トリメチルアルミニウム(TMA)、TMG、 NH_3 を使用して、AlN膜やGaAlN膜を用いてもなんら影響はない。

【0071】次に、 N_2 と NH_3 をそれぞれ5リットル/min流しながら約1050℃まで昇温する。温度が上がれば、キャリアガスを N_2 から H_2 に代えて、TMGを100 μ mol/min、 SiH_4 を10nmol/min導入して、n型Ga_{1-x}Nコンタクト層を0.1~10 μ m（たとえば約4 μ m）成長する。次に、TMGの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、約800℃まで降温後、TMGを15 μ mol/minに調整し、インジウム原料であるトリメチルインジウム（TMI）を一定量流しながら、 In_rGa_{1-r} 緩衝層（たとえば $r=0.07$ ）を0~200nm（たとえば50nm）成長する。次に、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から N_2 に代えて、TMGの流量を50 μ mol/minに調整し、TMAを40 μ mol/min導入して、n型の $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ クラッド層（たとえば $x1=0.1$ ）を0.2~0.8 μ m（たとえば0.4 μ m）の厚さで成長する。次に、TMGおよびTMAの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、約800℃まで降温後、TMGを15 μ mol/minに調整し、TMIを一定量流しながら、 In_pGa_{1-p} 緩衝層（たとえば $p=0.02$ ）を10~200nm（たとえば50nm）成長する。次に、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に代えて、TMGの流量を50 μ mol/minに調整し、TMAを40 μ mol/min導入して、n型の $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ クラッド層（たとえば $x2=0.1$ ）を0.2~0.8 μ m（たとえば0.5 μ m）の厚さで成長する。 $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ の成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGを100 μ mol/minに調整して、n型Ga_{1-y}Nガイド層を0.08~0.15 μ m（たとえば0.1 μ m）の厚さになるように成長する。

【0072】その後、TMGの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、700℃まで降温し、インジウム原料であるトリメチルインジウム（TMI）を10 μ mol/min、TMGを15 μ mol/min導入し、 $In_vGa_{1-v}N$ （たとえば $v=0.05$ ）よりなるたとえば4nm厚の障壁層を成長する。その後、TMIの供給を50 μ mol/minに増加し、 $In_wGa_{1-w}N$ （たとえば $w=0.17$ ）よりなるたとえば2nm厚の井戸層を成長する。たとえば、井戸層は合計3層、同様の手法で成長を行い、井戸層と井戸層との間および両側には合計4層の障壁層が存在するような発光波長約380~430nm（たとえば400~410nm）の多重量子井戸（MQW）を成長する。MQWの成長が終了すると、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に代えて、TMGを50 μ mol/min、TMAを30 μ mol/min、p型ドーピング原料で

あるビスシクロペンタジエニルマグネシウム（ Cp_2Mg ）を10nmol/min流し、0~20nm（たとえば20nm）厚のp型 $Al_zGa_{1-z}N$ （たとえば $z=0.2$ ）キャリアブロック層を成長する。キャリアブロック層の成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGの供給量を100 μ mol/minに調整して、0.08~0.15 μ m（たとえば0.1 μ m）の厚さのp型Ga_{1-y}Nガイド層を成長する。その後、TMGの供給を50 μ m/minに調整し、TMAを40 μ mol/min導入し、0.2~0.8 μ m（たとえば0.5 μ m）厚のp型 $Al_yGa_{1-y}N$ クラッド層（たとえば $y=0.1$ ）を成長する。最後に、TMGの供給を100 μ mol/minに調整して、TMAの供給を停止し、0.01~10 μ m（たとえば0.1 μ m）厚のp型Ga_{1-y}Nコンタクト層の成長を行い発光素子構造の成長を終了する。成長が終了すると、TMGおよび Cp_2Mg の供給を停止して降温し、室温でMOCVD装置より取り出す。

【0073】本レーザ構造を有する膜の最表面（成長終端面）の表面粗さの平均値（Ra）は約10nmであり、大変良好な平坦性を示した。また、（0001）C面サファイア基板、Ga_{1-y}N低温バッファ層（膜厚20nm）、n型Ga_{1-y}Nコンタクト層（膜厚約4 μ m）、n型 $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ クラッド層（膜厚0.5 μ m）、n型 $In_{0.03}Ga_{0.97}N$ 緩衝層（膜厚50nm）、n型 $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ クラッド層（膜厚0.5 μ m）なる構造を有するウェハを複数枚作製し、表面を光学顕微鏡で約200倍に拡大して観察したところ、全てのウェハにおいて六角形のクラックは確認されなかった。このウェハにおいて、n型クラッド層の膜厚合計は約1 μ mであった。従来の技術における課題が解消されたのは、n型クラッド層中に少なくともInを含む緩衝層が形成されたことによる効果に他ならない。

【0074】その後、フォトリソグラフィ技術および反応性イオンエッチング技術を用い、p型Ga_{1-y}Nコンタクト層を3 μ m幅のストライプ状に残して、p型 $Al_yGa_{1-y}N$ クラッド層までエッチングを行い、光導波路を形成した後、フォトリソグラフィ技術を用いてp型Ga_{1-y}Nコンタクト層が電極と接触する部分を除いて絶縁膜を形成する。その後、反応性イオンエッチング技術を用いて、ウェハ最表面よりn型Ga_{1-y}Nコンタクト層の途中まで、負電極を形成する部分を除去する。その後、メサ状のp型Ga_{1-y}Nコンタクト層の一部露出した面上に、正電極を形成する。電極材料としては、たとえばAu/NiあるいはAu/Pdを用いれば良い。また、n型Ga_{1-y}Nコンタクト層の一部露出した面上の概略全面に、負電極を形成する。負電極材料としては、たとえばAl/TiあるいはAu/Wを用いれば良い。

【0075】最後に、サファイア基板の半導体多層膜面と相反する面側を研磨することにより、半導体多層膜面

およびサファイア基板を含めた層厚が30~300 μ m (たとえば約60 μ m)となるようにする。その後、劈開を用いて素子長が約0.5mmとなるようにして、ミラーとなる端面を形成した。

【0076】以上により、図4に示す第1の実施の形態の半導体レーザ素子が作製できる。本実施の形態における半導体レーザ素子において、n型AlGaInNクラッド層中に含まれるn型InGaInN緩衝層の膜厚およびIn混晶比は、レーザ発振モードがn型InGaInN緩衝層と、その近隣層であるn型AlGaInNクラッド層で構成される3層スラブ導波路に結合しない条件式(1)が成り立つように設計されている。

【0077】図20は、条件式(1)が成り立つ条件を図示した例である。図において、曲線211、212は、 $F=0.4$ となるInGaInN緩衝層のIn混晶比および膜厚の条件を表している。また、領域Bは、曲線211と曲線212で挟まれた領域を表しており、 $F>0.4$ となる条件、即ち条件式(1)が成り立たない領域を表している。また、領域Aは、図で曲線211より下の領域を表しており、 $F<0.4$ となる条件、即ち条件式(1)が成り立つ領域を表している。また、領域Cと領域Dは、曲線212より上の領域を表しており、 $F<0.4$ となる条件、即ち条件式(1)が成り立つ領域を表している。

【0078】曲線213は、InGaInN緩衝層と、その近隣層であるAlGaInNクラッド層で構成される3層スラブ導波路において、基本次導波モード以外の高次導波モードが、生ずる領域と生じない領域の境界を表している。領域Dは、曲線213より上の領域を表しており、高次導波モードが生ずる領域を表している。領域Aと領域Bと領域Cは、曲線213より下の領域を表しており、高次導波モードが生じない領域を表している。InGaInN緩衝層で高次導波モードを生ずる場合、その最高次モードとレーザ発振モードで決定されるFパラメータが(1)式を満たすように、InGaInN緩衝層のIn混晶比および膜厚を設定してもよいが、高次導波モードを*

$$t_1 = (0.0067725 + 0.50578 p_1)^{-1} \quad (0 \leq p_1 \leq 0.09) \\ -10.86 + 321.88 p_1 \quad (0.09 \leq p_1 \leq 0.2)$$

同様に、領域Bと領域Cの境界線212は、次式で表される。

$$t_1 = (0.0014296 + 0.13014 p_1)^{-1} \quad (0 \leq p_1 \leq 0.09) \\ -42.254 + 1273.3 p_1 \quad (0.09 \leq p_1 \leq 0.2)$$

これを用いて、領域<1>は次式で表される。

$$【0083】 0.001 \leq p_1 \leq 0.09 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq (0.0067725 + 0.50578 p_1)^{-1}$$

領域<2>は次式で表される。

$$【0084】 0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ かつ } 10 \leq t_1 \leq -10.86 + 321.88 p_1$$

領域<3>は次式で表される。

$$【0085】 0.001 \leq p_1 \leq 0.09 \text{ かつ } (0.0014296 + 0.13014 p_1)^{-1} \leq t_1 \leq 200$$

*生ずる領域では、多くの場合(1)式を満たさないで、InGaInN緩衝層に高次導波モードが生ずるか否かで議論しても、実際上問題ない。

【0079】従って、レーザ発振モードが、InGaInN緩衝層に結合しないためには、InGaInN緩衝層のIn混晶比および膜厚が、図の領域Aまたは領域Cに含まれるように、作製すればよいことになる。

【0080】しかし、作製する上では、上記領域は更に限定される。本発明者らの実験によると、InGaInN緩衝層を200nm以上積層すると、その上に積層された半導体層の結晶性が悪化した。また、In混晶比が0.2以上のInGaInN緩衝層を積層すると、その上に積層された半導体層の結晶性が悪化した。このことから、InGaInN緩衝層の膜厚は200nm以下、In混晶比は0.2以下とするのがよい。さらに、InGaInN緩衝層は僅かにInを含む程度(In混晶比~0.001のとき)でもクラック防止効果が発生し、In混晶比を変化させてもクラック防止効果の度合いはほとんど変わらなかった。また、InGaInN緩衝層はわずかな膜厚(膜厚~10nmのとき)でもクラック防止の効果が発生し、In混晶比を変化させてもクラック防止効果の度合いはほとんど変わらなかった。

【0081】従って、レーザ発振モードが、InGaInN緩衝層に結合しないための、InGaInN緩衝層のIn混晶比および膜厚が満たすべき領域は、領域Aまたは領域Cの領域の中で、さらにIn混晶比が0.001以上0.2以下であり、かつ、膜厚が10nm以上200nm以下の領域に限定される。

【0082】図21は、InGaInN緩衝層が満たすべき領域を、図示したものである。図において、InGaInN緩衝層が満たすべき領域は、<1>~<4>で示されている。同図を用いて、InGaInN緩衝層が満たすべき領域を、数式で表示する過程を説明する。InGaInN緩衝層のIn混晶比を p_1 、膜厚を t_1 [nm]としたとき、領域Aと領域Bの境界線211は次式で表される。

領域<4>は次式で表される。

$$【0086】 0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ かつ } -42.254 + 1273.3 p_1 \leq t_1 \leq 200 \text{ 即ち、InGaInN緩衝層のIn混晶比 } p_1 \text{ および膜厚 } t_1 \text{ [nm] が満たすべき条件は、} (p_1, t_1) \text{ が上式で示される } <1> \text{ から } <4> \text{ のいずれかの領域内に含まれることである。}$$

【0087】ところで、図20における、領域Aと領域Bの境界線211、および、領域Bと領域Cの境界線212、および、領域Cと領域Dの境界線213は、In

GaN緩衝層の周りの構造によって、変化する。以下に示す図5～図8は、InGaN緩衝層の周りの構造を変化させたときの、それぞれの境界線の変化を示しており、図5はAlGaNクラッド層のAl混晶比を、図6および図7は緩衝層からガイド層までの距離を、図8はガイド層の層厚を、それぞれ変化させた時の、境界線の変化を表している。

【0088】図5は、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、(1)式を満たすようなn型InGaN緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、(1)式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードがInGaN緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、InGaN緩衝層中において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再びInGaN緩衝層に結合しやすい条件となるため、この範囲は避けるべきである。

【0089】線51から59は、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を、種々の条件において示したものである。全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型InGaN緩衝層とn型ガイド層との距離が $0.4\mu\text{m}$ となっており、p型GaNガイド層およびn型GaNガイド層の膜厚が $0.08\mu\text{m}$ となっている。また、実線51、52、53は、n型AlGaNクラッド層中に含まれる全てのn型AlGaNクラッド層、およびp型AlGaNクラッド層のAl混晶比を 0.08 とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示している。実線51はAとBの境界、実線52はBとCの境界、実線53はCとDの境界を示している。また、破線54、55、56は、n型AlGaNクラッド層中に含まれる全てのn型AlGaNクラッド層、およびp型AlGaNクラッド層のAl混晶比を 0.10 とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、破線54はAとBの境界、破線55はBとCの境界、破線56はCとDの境界を示している。また、点線57、58、59は、n型AlGaNクラッド層中に含まれる全てのn型AlGaNクラッド層、およびp型AlGaNクラッド層のAl混晶比を 0.12 とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、点線57はAとBの境界、点線58はBとCの境界、点線59はCとDの境界を示している。線51から59のうち、実線51、52、53については、InGaN緩衝層のIn混晶比を x_1 、膜厚を $t_1[\mu\text{m}]$ として、実線51は $x_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0067725 + 0.50578x_1)^{(-1)}$ 、 $0.09 \leq x_1 \leq 0.2$ で $t_1 = -10.86 + 321.88x_1$ 、実線52は $x_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0014296 + 0.13014x_1)^{(-1)}$ 、 $0.09 \leq x_1$

≤ 0.2 で $t_1 = -42.254 + 1273.3x_1$ 、実線53は $x_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0020902 + 0.031559x_1)^{(-1)}$ 、 $0.09 \leq x_1 \leq 0.2$ で $t_1 = 111.52 + 1110.5x_1$ で近似できる。

【0090】図6は、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、(1)式を満たすようなn型InGaN緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、(1)式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードがInGaN緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、InGaN緩衝層中において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再びInGaN緩衝層に結合しやすい条件となるため、この範囲は避けるべきである。

【0091】線61から69は、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を、種々の条件において示したものである。全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型AlGaNクラッド層中に含まれる全てのn型AlGaNクラッド層、およびp型AlGaNクラッド層のAl混晶比が 0.08 となっており、p型GaNガイド層およびn型GaNガイド層の膜厚が $0.08\mu\text{m}$ となっている。また、実線61、62、63は、n型InGaN緩衝層とn型ガイド層との距離を $0.4\mu\text{m}$ とした場合の、

(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、実線61はAとBの境界、実線62はBとCの境界、実線63はCとDの境界を表している。破線64、65、66は、n型InGaN緩衝層とn型ガイド層との距離を $0.6\mu\text{m}$ とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、破線64はAとBの境界、破線65はBとCの境界、破線66はCとDの境界を表している。また、点線67、68、69は、n型InGaN緩衝層とn型ガイド層との距離を $0.8\mu\text{m}$ とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、点線67はAとBの境界、点線68はBとCの境界、点線69はCとDの境界を表している。線61から69のうち、点線67、68、69については、InGaN緩衝層のIn混晶比を x_1 、膜厚を $t_1[\mu\text{m}]$ として、点線67は、 $x_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0044063 + 0.3622x_1)^{(-1)}$ 、 $0.09 \leq x_1 \leq 0.2$ で $t_1 = -17.958 + 479x_1$ 、点線68は $x_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0031223 + 0.26847x_1)^{(-1)}$ 、 $0.09 \leq x_1 \leq 0.2$ で $t_1 = -25.867 + 664.45x_1$ 、点線69は $x_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0020902 + 0.031559x_1)^{(-1)}$ 、 $0.09 \leq x_1 \leq 0.2$ で $t_1 = 111.52 + 1110.5x_1$ で近似できる。

【0092】なお、本明細書中において、n型（または

p型)ガイド層とn型(またはp型)InGa_N緩衝層の距離とは、ガイド層の活性層と相反する側の面から、緩衝層の活性層に近い側の面までの、半導体層全面に渡る平均距離を表すものとする。

【0093】図7は、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、(1)式を満たすようなn型InGa_N緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、(1)式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードがInGa_N緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、InGa_N緩衝層中において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再びInGa_N緩衝層に結合しやすい条件となるため、この範囲は避けるべきである。

【0094】線71から79は、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を、種々の条件においてしめたものである。全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型AlGaInNクラッド層中に含まれる全てのn型AlGa_Nクラッド層、およびp型AlGa_Nクラッド層のAl混晶比が0.08となっており、p型Ga_Nガイド層およびn型Ga_Nガイド層の膜厚が0.08μmとなっている。また、実線71、72は、n型InGa_N緩衝層とn型ガイド層との距離を0.2μmとした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、実線71はAとBの境界、実線72はBとCの境界、実線73はCとDの境界を表している。破線74、75、76は、n型InGa_N緩衝層とn型ガイド層との距離を0.3μmとした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、破線74はAとBの境界、破線75はBとCの境界、破線76はCとDの境界を表している。また、点線77、78、79は、n型InGa_N緩衝層とn型ガイド層との距離を0.4μmとした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、点線77はAとBの境界、点線78はBとCの境界、点線79はCとDの境界を表している。線71から79のうち、実線71については、InGa_N緩衝層のIn混晶比を p_1 、膜厚を t_1 [μm]として、 $p_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0097376 + 0.69271p_1)^{-1}$ 、 $0.09 \leq p_1 \leq 0.2$ で $t_1 = -6.6349 + 222.72p_1$ で近似できる。また、破線72は、 $p_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0080268 + 0.58533p_1)^{-1}$ 、 $0.09 \leq p_1 \leq 0.2$ で $t_1 = -8.9956 + 273.95p_1$ で近似できる。破線75は、 $p_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0017672 + 0.088604p_1)^{-1}$ 、 $0.09 \leq p_1 \leq 0.2$ で $t_1 = -103.63 + 2403.3p_1$ 、点線73は $p_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0067725 + 0.50578p_1)^{-1}$ 、 $0.09 \leq p_1 \leq$

0.2で $t_1 = -10.86 + 321.88p_1$ 、点線76は $p_1 \leq 0.09$ で $t_1 = (0.0014296 + 0.13014p_1)^{-1}$ 、 $0.09 \leq p_1 \leq 0.2$ で $t_1 = -42.254 + 1273.3p_1$ で近似できる。

【0095】図8は、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、(1)式を満たすようなn型InGa_N緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、(1)式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードがInGa_N緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、InGa_N緩衝層中において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再びInGa_N緩衝層に結合しやすい条件となるため、この範囲は避けるべきである。

【0096】線81から89は、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を、種々の条件においてしめたものである。全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型AlGaInNクラッド層中に含まれる全てのn型AlGa_Nクラッド層、およびp型AlGa_Nクラッド層のAl混晶比が0.08となっており、n型InGa_N緩衝層とn型ガイド層との距離が0.4μmとなっている。また、実線81、82、83は、Ga_Nガイド層の層厚を0.08μmとした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、実線81はAとBの境界、実線82はBとCの境界、実線83はCとDの境界を表している。破線84、85、86は、Ga_Nガイド層の層厚を0.10μmとした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、破線84はAとBの境界、破線85はBとCの境界、破線86はCとDの境界を表している。点線87、88、89は、Ga_Nガイド層の層厚を0.15μmとした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、点線87はAとBの境界、点線88はBとCの境界、点線89はCとDの境界を表している。

【0097】なお、図8の計算結果は、簡単のために上下のガイド層膜厚を対称としたが、これが非対称であってもよく、この場合、上下ガイド層の平均厚さ、即ちp型ガイド層およびn型ガイド層の膜厚をそれぞれ d_1 [μm]、 d_2 [μm]としたとき、 $(d_1 + d_2) / 2 = d$ を、ガイド層膜厚と考えれば、図8の関係はそのままだほぼ同じになる。但し、実用的には非対称をあまり大きくすると、活性層への光閉じ込めに悪影響を及ぼすので、そうならない範囲におのずから限定される。実用的には、 $0.33 \leq d_1 / d_2 \leq 3$ が必要であり、特に好ましくは、 $0.56 \leq d_1 / d_2 \leq 1.8$ である。

【0098】図5～図8より、(1)式を満たす領域が最も狭くなるのは本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型AlGaInNクラッド層中に含まれ

る全てのn型AlGaInクラッド層、およびp型AlGaInクラッド層のAl混晶比が0.08、n型InGaIn緩衝層とn型ガイド層との距離が0.4μmであり、かつGaInガイド層厚が0.08μmとなっている時である。実際に半導体レーザ素子を作製する時は、InGaIn緩衝層の膜厚およびIn混晶比が(1)式を満たす領域、即ちAまたはCの領域に入るよう考慮して設計するが、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界線から十分離れた領域に相当する値をとることが望ましい。

【0099】また、本発明者らの実験によると、InGaIn緩衝層を200nm以上積層すると、その上に積層された半導体層の結晶性が悪化した。また、In混晶比が0.2以上のInGaIn緩衝層を積層すると、その上に積層された半導体層の結晶性が悪化した。このことから、InGaIn緩衝層の膜厚は200nm以下、In混晶比は0.2以下とするのがよい。さらに、InGaIn緩衝層は僅かにInを含む程度(In混晶比が0.001以下のとき)でもクラック防止の効果が発生し、In混晶比を変化させてもクラック防止効果の度合いはほと

$$-103.63+2403.3p_1 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

..... (2)

(b) 0.3~0.4μmのときは、

$$10 \leq t_1 \leq (0.0067725 + 0.50578$$

$$p_1)^{(-1)} \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq -10.86 + 321.88p_1 \text{ かつ } 0.0 \leq$$

$$-42.254 + 1273.3p_1 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

..... (3)

(c) 0.4μm以上のときは、

$$10 \leq t_1 \leq (0.0044063 + 0.3622p_1)$$

$$^{(-1)} \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq -17.958 + 479p_1 \text{ かつ } 0.09 < \star$$

$$-25.867 + 664.45p_1 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

..... (4)

の領域内であることが判る。上記範囲は、レーザ発振の中心波長が370~430nm(20℃)の範囲で計算しても、またInGaIn緩衝層とガイド層との間に介装されるAlGaInクラッド層の混晶比を0.08から0.2の範囲で計算しても、またn型InGaIn緩衝層とn型ガイド層との距離を0.4~0.8μmの範囲で計算しても、同じであった。

【0101】以上の手順により、特に(b)の場合の結果として、およそ、

$$0.001 \leq p_1 \leq 0.01 \text{ の場合には } t_1 \leq 80、$$

$$0.01 < p_1 \leq 0.02 \text{ の場合には } t_1 \leq 60、$$

$$0.02 < p_1 \leq 0.03 \text{ の場合には } t_1 \leq 50、$$

$$0.03 < p_1 \leq 0.04 \text{ の場合には } t_1 \leq 40、$$

*な膜厚(膜厚10nm以下)でもクラック防止の効果が発生し、In混晶比を変化させてもクラック防止効果の度合いはほとんど変わらなかった。

【0100】以上より、本実施の形態における半導体レーザ素子中において、InGaIn緩衝層のIn混晶比を p_1 、膜厚を t_1 [nm]としたとき、(p_1 , t_1)が満たすべき領域を、InGaIn緩衝層とGaInガイド層との距離が(a)0.2~0.3μmのとき、(b)0.3~0.4μmのとき、(c)0.4以上のとき、と場合分けして、およそ、

(a) 0.2~0.3μmのときは、

$$10 \leq t_1 \leq (0.0080268 + 0.58533$$

$$p_1)^{(-1)} \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq -8.9956 + 273.95p_1 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(0.00017672 + 0.088604p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

$$\leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$\star 9 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(0.0014296 + 0.13014p_1)^{(-1)} \leq t_1$$

$$\leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$\star p_1 \leq 0.2$$

または

$$(0.0031223 + 0.26847p_1)^{(-1)} \leq t_1$$

$$\leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$-25.867 + 664.45p_1 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

..... (4)

$$0.04 < p_1 \leq 0.05 \text{ の場合には } t_1 \leq 30 \text{ または } 1$$

$$60 \leq t_1 \leq 200、$$

$$0.05 < p_1 \leq 0.06 \text{ の場合には } t_1 \leq 25 \text{ または } 1$$

$$30 \leq t_1 \leq 200、$$

$$0.06 < p_1 \leq 0.07 \text{ の場合には } t_1 \leq 22 \text{ または } 1$$

$$10 \leq t_1 \leq 200、$$

$$0.07 < p_1 \leq 0.11 \text{ の場合には } t_1 \leq 20 \text{ または } 1$$

$$00 \leq t_1 \leq 200、$$

$$0.11 < p_1 \leq 0.12 \text{ の場合には } t_1 \leq 23 \text{ または } 1$$

$$10 \leq t_1 \leq 200、$$

$$0.13 < p_1 \leq 0.14 \text{ の場合には } t_1 \leq 30 \text{ または } 1$$

$$40 \leq t_1 \leq 200、$$

$$0.14 < p_1 \leq 0.15 \text{ の場合には } t_1 \leq 32 \text{ または } 1$$

$50 \leq t_1 \leq 200$ 、
 $0.15 < p_1 \leq 0.16$ の場合には $t_1 \leq 35$ または $165 \leq t_1 \leq 200$ 、
 $0.16 < p_1 \leq 0.17$ の場合には $t_1 \leq 40$ または $175 \leq t_1 \leq 200$ 、
 $0.17 < p_1 \leq 0.18$ の場合には $t_1 \leq 45$ または $190 \leq t_1 \leq 200$ 、
 $0.18 < p_1 \leq 0.20$ の場合には $t_1 \leq 50$
 の範囲内で上記条件を満たすことが判る。(a)、

(c) の場合については、冗長のため掲載しない。本実施の形態の半導体レーザ素子の作製方法に記載した InGaN 緩衝層の例として挙げた膜厚は 50 nm、混晶比は 0.02 であり、上記範囲内に含まれている。

【0102】良好な光学特性を得るための、InGaN 緩衝層の In 組成 p_1 および膜厚 t_1 は、上記領域に限定されるが、次のような要請から、InGaN 緩衝層の好ましい範囲はさらに制限される。p 型クラッド層内ないし n 型クラッド層内に介装される InGaN 緩衝層における吸収は、レーザ発振モードの吸収を引き起こし、閾値電流密度の増加を招くため、InGaN 緩衝層における吸収係数は、小さい方がより望ましい。InGaN 緩衝層の In 組成を大きくすると、InGaN 緩衝層におけるレーザ発振モードの吸収が大きくなるため、InGaN 緩衝層の In 組成は大きくすぎない方がよい。このため、さらに望ましくは上記範囲の制限に加えて、 $p_1 \leq 0.09$ という条件を付加した方がよい。

【0103】図 9 は、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造から、n 型 GaN コンタクト層層厚を変化させたときの、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数の変化を示した図である。n 型 AlGaInN クラッド層（総膜厚約 0.8 μm ）中に介装される n 型 InGaN 緩衝層の混晶比および膜厚が、図 5 から図 8 に示す領域 A、領域 B、領域 C に属する場合の特性がそれぞれ特性 91、92、93 に示されている。図中において、特性 91 は、InGaN 緩衝層の混晶比が 0.02、層厚が 50 nm のときの特性である。特性 92 は、混晶比が 0.07、層厚が 50 nm のときの特性である。特性 93 は、混晶比が 0.09、層厚が 100 nm のときの特性である。また、特性 94 は、n 型 AlGaInN クラッド層が n 型 AlGaInN クラッド層（膜厚 0.8 μm ）のみで構成されている場合の特性であり、図中に示されている。n 型 GaN コンタクト層層厚を変化させたとき、特

性 91、92、93、94 の全てにおいて、活性層閉じ込め係数の落ち込みが見られるが、これはレーザ発振モードの n 型 GaN コンタクト層への染み出しが大きくなる最悪条件になっているときである。このような条件にある時は、閾値電流密度の増大、FFP におけるリップルの発生という問題が顕著となってしまう。

【0104】図より、特性 91 および 93 は、特性 92 に比べて、前記活性層閉じ込め係数の落ち込みを生ずる領域が狭くなっていることがわかる。これは、特性 92 の条件において、レーザ発振モードが InGaN 緩衝層に結合しやすい状況になっており、この InGaN 緩衝層に結合したレーザ発振モードが n 型 GaN コンタクト層へ染み出しやすいためである。即ち、n 型 AlGaInN クラッド層中に介装される n 型 InGaN 緩衝層の混晶比および膜厚を、(1) 式または (2) ~ (4) 式を満たす領域に設定することにより、レーザ発振モードの n 型 GaN コンタクト層への結合を抑制することができ、閾値電流密度の低下、および FFP におけるリップルの抑制という効果が発生する。

【0105】また、特性 91、93 の場合は、特性 92 の場合に比べて、図に示した n 型 GaN コンタクト層厚の範囲全域に渡り、活性層閉じ込め係数が上昇している。これは、92 の場合はレーザ発振モードが InGaN 緩衝層に強く結合する条件になっており、InGaN 緩衝層におけるレーザ発振モードの電界振幅が大きく、それによる活性層閉じ込め係数の低下が生じていたのが、91 および 93 の場合はレーザ発振モードの InGaN 緩衝層への結合が抑制されたことにより、活性層閉じ込め係数の向上が図られたことによるものである。

【0106】本実施の形態で作製したレーザ素子のほとんど全てが発振し、発振の閾値電圧 (V_p) が約 5 V、閾値電流密度 (J_{th}) が約 2 kA/cm² であった。また、従来の半導体レーザでは、クラックがない素子においても、連続して 10 時間以上発振を継続させていると、光出力が急激に低下する現象が生じてきたが、n 型 AlGaInN クラッド層中に n 型 InGaN 緩衝層を挿入した本実施例に示すレーザは、約 1000 時間経過しても、特性の変化は見られなかった。また、FFP は単峰であり、良好な光学特性が実現できた。

【0107】

【表 1】

	InGaN緩衝層		図21において 属する領域	レーザ発振モ ードの活性層 閉じ込め係数 (相対値)	レーザ発振モード の電界分布
	In混晶比 p_1	膜厚 t_1 [nm]			
理論値	—	0		1 (基準)	
case 1	0.02	50	<1>	0.98	図3(a)に類似
case 2	0.15	30	<2>	0.97	図3(a)に類似
case 3	0.05	170	<3>	0.92	図3(a)に類似
case 4	0.11	125	<4>	0.93	図3(a)に類似
case 5	0.03	120	B	0.65	図3(b)に類似
case 6	0.17	70	B	0.59	図3(b)に類似

【0108】表1は、用いたInGaN緩衝層のIn混晶比および膜厚の組み合わせとして、種々の場合を用いた場合の実験結果を示している。理論値は、与えられた構造から、InGaN緩衝層を除去した場合（即ち、InGaN緩衝層の膜厚を0nmとした場合）の、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数を計算した結果である。case 1～case 6は、図21においてそれぞれ点214、215、217、218、219、220に相当する点である。case 1は領域<1>に属し、case 2は領域<2>に属し、case 3は領域<3>に属し、case 4は領域<4>に属し、case 5およびcase 6は共に領域Bに属している。InGaN緩衝層の周辺の構造については、case 1からcase 6までの全てにおいて、n型InGaN緩衝層からn型Ga_{0.98}Nガイド層までの距離が0.4μm、n型AlGa_{0.15}Nクラッド層のAl混晶比が0.1、n型Ga_{0.98}Nガイド層膜厚およびp型Ga_{0.98}Nガイド層膜厚がともに0.1μmとなっている。レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数は、InGaN緩衝層の膜厚が0nmの場合（理論値）の値を1とした場合の相対値を示している。これを見ると、case 1、case 2、case 3、case 4のいずれにおいても、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数は、InGaN緩衝層の膜厚が0nmの場合（理論値）の9割以上の値を示しており、レーザ発振モードの電界分布は、図3(a)と同様であり、FFPは単峰的であった。これに対し、case 5、case 6においては、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数は、InGaN緩衝層の膜厚が0nmの場合（理論値）の9割以下となっており、レーザ発振モードの電界分布は図3(b)と同様であり、FFPはリップルが多数散見された。以上より、InGaN緩衝層のIn混晶比および膜厚を、所定の範囲内に設定したことにより、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数の向上、および、FFPにおけるリップルの抑制が図られたことが、実験的に確認できた。

【0109】なお、本実施の形態においては、n型AlGa_{0.15}InNクラッド層中に含まれるn型AlGa_{0.15}Nクラッド層、およびp型AlGa_{0.15}NにおけるAl混晶比は必ずしも全て同じである必要はなく、その際においても前

記Fなるパラメータが（1）式を満たすように設計されたInGa_{0.98}N緩衝層をn型AlGa_{0.15}InNクラッド層中に含む構造を有する半導体レーザ素子であれば、本発明の効果は発生する。しかし、レーザ発振モードの対称性を考慮すれば、半導体レーザ素子構造中におけるAlGa_{0.15}Nクラッド層のAl混晶比は全て同一にすることが望ましい。

【0110】また、本実施の形態において、活性層は3重量子井戸としたが、2層または4層以上の多重量子井戸にしても、本発明において必要とされる関係式（1）およびInGa_{0.98}N緩衝層に関して必要とされる関係式（2）～（4）は変わらず、発生する効果は同じであった。

【0111】なお、本実施の形態における半導体レーザの構造でn型AlGa_{0.15}InNクラッド層とn型Ga_{0.98}Nコンタクト層の間に介装されるn型In_rGa_{1-r}N緩衝層は、半導体多層ウェハのクラックをさらに減少させる効果を有するが、なくても本発明の請求範囲に含まれるものであり、半導体レーザ素子の活性層閉じ込め係数およびFFPにはほとんど影響を与えない。

【0112】また、本実施の形態における半導体レーザ素子に用いた基板は、サファイアを用いたが、他の基板でも良く、たとえばGa_{0.98}N基板でもよい。この場合、AlGa_{0.15}InNクラッド層中に介装されるInGa_{0.98}N緩衝層の混晶比および膜厚が満たすべき条件の範囲は、サファイア基板の場合と同じであった。

【0113】（実施の形態2）図4は、本発明の第2の実施の形態を示す半導体レーザ素子の模式図である。図は、半導体レーザの導波路部分の共振器に垂直な断面を示している。本半導体レーザ素子は、（0001）C面サファイア基板1（膜厚30～300μm）、Ga_{0.98}N低温バッファ層2（膜厚0～100nm）、n型Ga_{0.98}Nコンタクト層3（膜厚0.1～10μm）n型In_rGa_{1-r}N（0≤r≤0.2）緩衝層41（膜厚0～200nm）、n型Al_{x1}Gal_{1-x1}N（0.08≤x1≤0.2）クラッド層4（膜厚0.2～0.8μm）とn型In_{p1}Ga_{1-p1}N（0.001≤p1≤0.2）緩衝層5（膜厚10～200nm）とn型Al_{x2}Ga_{1-x2}N（0.08≤x2≤0.2）クラッド層4（膜厚0.2

～0.8 μm) かなる n 型 AlGaInN クラッド層 15 (総膜厚約 0.8～1.0 μm)、n 型 In_sGa_{1-s}N (0<s≤0.1) ガイド層 6 (膜厚 0.08～0.15 μm)、In_wGa_{1-w}N (0<w<0.2) 井戸層と In_vGa_{1-v}N (0<v<w) 障壁層との交互多層構造 (障壁層/井戸層/・・・/井戸層/障壁層) かなる多重量子井戸活性層 7 (発光波長 370～430 nm、総膜厚 5～60 nm)、p 型 Al_zGa_{1-z}N (0≤z≤0.3) キャリアブロック層 8 (膜厚 0～20 nm)、p 型 In_tGa_{1-t}N (0<t≤0.1) ガイド層 9 (膜厚 0.08～0.15 μm)、p 型 Al_yGa_{1-y}N (0.08≤y≤0.2) クラッド層 10 (膜厚 0.2～0.8 μm)、p 型 GaN コンタクト層 11 (膜厚 0.01～1.0 μm) の各窒化物系半導体層が形成されている。

【0114】その上には、必要な形状の絶縁膜 12 が、メサ上の概略全面に形成されている。正電極 13 (たとえば、Pd/Au、Ni/Pd/Au、Pd/Pt/Au 等) は、p 型 GaN コンタクト層の一部露出した面上の全面を含む、メサ上の概略全面に形成されている。負電極 14 (たとえば、Ti/Al、Zr/Al、Hf/Al など) は、n 型 GaN コンタクト層の一部露出した面上に形成されている。メサは、n 型 GaN コンタクト層、n 型 InGa_N 緩衝層、n 型 AlGaInN クラッド層、n 型 InGa_N ガイド層、InGa_N 多重量子井戸活性層、p 型 AlGa_N キャリアブロック層、p 型 InGa_N ガイド層、p 型 AlGa_N クラッド層、p 型 GaN コンタクト層、絶縁膜 (但し前記絶縁膜は必要領域のみ)、正電極より構成されている。ストライプの両端面はミラーとして働き、光共振器を構成している。

【0115】次に、本実施の形態における半導体レーザの製造方法について述べる。まず、(0001) C 面サファイア基板を洗浄する。洗浄した (0001) C 面サファイア基板を MOCVD 装置内に導入し、H₂ 雰囲気の中で、約 1100℃ の高温でクリーニングを行う。その後、降温して、キャリアガスとして水素 (H₂) を 10 リットル/分 流しながら、600℃ で NH₃ とトリメチルガリウム (TMG) をそれぞれ 5 リットル/分、20 mol/分 導入して、0～100 nm (たとえば約 20 nm) の厚みの Ga_N 低温バッファ層を成長する。低温バッファ層としては、Ga_N に限らず、トリメチルアルミニウム (TMA)、TMG、NH₃ を使用して、Al_N 膜や GaAl_N 膜を用いてもなら影響はない。

【0116】次に、N₂ と NH₃ をそれぞれ 5 リットル/分 流しながら約 1050℃ まで昇温する。温度が上がれば、キャリアガスを N₂ から H₂ に代えて、TMG を 100 μmol/分、SiH₄ を 10 nmol/分 導入して、n 型 Ga_N コンタクト層を 0.1～1.0 μm (たとえば約 4 μm) 成長する。次に、TMG の供

給を停止して、キャリアガスを H₂ から N₂ に再び代えて、約 800℃ まで降温後、TMG を 15 μmol/分 に調整し、インジウム原料であるトリメチルインジウム (TMI) を一定量流しながら、In_rGa_{1-r}N 緩衝層 (たとえば r=0.07) を 0～200 nm (たとえば 50 nm) 成長する。次に、TMI および TMG の供給を停止して、再び 1050℃ まで昇温し、キャリアガスを再び N₂ から H₂ に代えて、TMG の流量を 50 μmol/分 に調整し、TMA を 40 μmol/分 導入して、n 型の Al_{x1}Ga_{1-x1}N クラッド層 (たとえば x₁=0.1) を 0.2～0.8 μm (たとえば 0.5 μm) の厚さで成長する。次に、TMG および TMA の供給を停止して、キャリアガスを H₂ から N₂ に再び代えて、約 800℃ まで降温後、TMG を 15 μmol/分 に調整し、TMI を一定量流しながら、In_pGa_{1-p}N 緩衝層 (たとえば p=0.02) を 10～200 nm (たとえば 50 nm) 成長する。次に、TMI および TMG の供給を停止して、再び 1050℃ まで昇温し、キャリアガスを再び N₂ から H₂ に代えて、TMG の流量を 50 μmol/分 に調整し、TMA を 40 μmol/分 導入して、n 型の Al_{x2}Ga_{1-x2}N クラッド層 (たとえば x=0.1) を 0.2～0.8 μm (たとえば 0.5 μm) の厚さで成長する。

【0117】Al_{x2}Ga_{1-x2}N の成長が終了すると、TMA および TMG の供給を停止し、キャリアガスを H₂ から N₂ に換えて、約 700℃ まで降温し、TMG を 15 μmol/分 に調整して、TMI を一定量流しながら、n 型 In_sGa_{1-s}N ガイド層 (たとえば s=0.01) を 0.08～0.15 μm (たとえば 0.1 μm) の厚さになるように成長する。TMI を 10 μmol/分 に調整し、In_vGa_{1-v}N (たとえば v=0.05) よりなるたとえば 4 nm 厚の障壁層を成長する。その後、TMI の供給を 50 μmol/分 に増加し、In_wGa_{1-w}N (たとえば w=0.17) よりなるたとえば 2 nm 厚の井戸層を成長する。たとえば、井戸層は合計 3 層、同様の手法で成長を行い、井戸層と井戸層との間および両側には合計 4 層の障壁層が存在するような発光波長 380～430 nm (たとえば 400～410 nm) の多重量子井戸 (MQW) を成長する。MQW の成長が終了すると、TMI および TMG の供給を停止して、再び 1050℃ まで昇温し、キャリアガスを再び N₂ から H₂ に代えて、TMG を 50 μmol/分、TMA を 30 μmol/分、p 型ドーピング原料であるビスシクロペンタジエニルマグネシウム (Cp₂Mg) を 10 nmol/分 流し、0～20 nm (たとえば 20 nm) 厚の p 型 Al_zGa_{1-z}N (たとえば z=0.2) キャリアブロック層を成長する。キャリアブロック層の成長が終了すると、TMA および TMG および Cp₂Mg の供給を停止し、キャリアガスを H₂ から N₂ に換えて、約 700℃ まで降温し、TMG を 15

$\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整して、TMGの供給量を $15\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整して、TMIを一定量流し、 Cp_2Mg を $10\text{nmol}/\text{min}$ 流し、p型 $\text{In}_t\text{Ga}_{1-t}\text{N}$ ガイド層（たとえば $t=0.01$ ）を $0.08\sim 0.15\mu\text{m}$ （たとえば $0.1\mu\text{m}$ ）成長する。TMAおよびTMGおよび Cp_2Mg の供給を停止して、再び 1050°C まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に変えて、その後、TMGの供給を $50\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、TMAを $40\mu\text{mol}/\text{min}$ 、 Cp_2Mg を $10\text{nmol}/\text{min}$ 導入し、 $0.2\sim 0.8\mu\text{m}$ （たとえば $0.5\mu\text{m}$ ）厚のp型 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ クラッド層（たとえば $y=0.1$ ）を成長する。最後に、TMGの供給を $100\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整して、TMAの供給を停止し、 $0.01\sim 10\mu\text{m}$ （たとえば $0.1\mu\text{m}$ ）厚のp型 GaN コンタクト層の成長を行い発光素子構造の成長を終了する。成長が終了すると、TMGおよび Cp_2Mg の供給を停止して降温し、室温でMOCVD装置より取り出す。

【0118】本レーザ構造を有する膜の最表面（成長終端面）の表面粗さの平均値（Ra）は約 10nm であり、大変良好な平坦性を示した。

【0119】その後、フォトリソグラフィ技術および反応性イオンエッチング技術を用い、p型 GaN コンタクト層を $3\mu\text{m}$ 幅のストライプ状に残して、p型 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ クラッド層までエッチングを行い、光導波路を形成した後、フォトリソグラフィ技術を用いてp型 GaN コンタクト層が電極と接触する部分を除いて絶縁膜を形成する。その後、反応性イオンエッチング技術を用いて、ウェハ最表面よりn型 GaN コンタクト層の途中まで、負電極を形成する部分を除去する。その後、メサ状のp型 GaN コンタクト層の一部露出した面上に、正電極を形成する。電極材料としては、たとえば Au/Ni あるいは Au/Pd を用いれば良い。また、n型 GaN コンタクト層の一部露出した面上の概略全面に、負電極を形成する。負電極材料としては、たとえば Al/Ti あるいは Au/W を用いれば良い。

【0120】最後に劈開あるいはドライエッチング法を用いて素子長が約 0.5mm となるようにして、ミラーとなる端面を形成した。

【0121】以上により、図4に示す第2の実施の形態の半導体レーザ素子が作製できる。本実施の形態における半導体レーザ素子においては、n型ガイド層およびp型ガイド層は、 InGaN で構成されている。また、本実施の形態における半導体レーザ素子においては、n型 AlGaInN クラッド層中に含まれるn型 InGaN 緩衝層の膜厚および In 混晶比は、レーザ発振モードがn型 InGaN 緩衝層と、その近隣層であるn型 AlGaN クラッド層で構成される3層スラブ導波路に結合しない条件式（1）が成り立つように設計されている。

【0122】図10は、 InGaN 緩衝層とガイド層と

の距離が $0.4\mu\text{m}$ 以上あるような、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、（1）式を満たすようなn型 InGaN 緩衝層の In 混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、（1）式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードが InGaN 緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、 InGaN 緩衝層中において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再び InGaN 緩衝層に結合しやすい条件となるため、この範囲は避けるべきである。

【0123】線101から109は、（1）式を満たす領域（A、C）と満たさない領域（B）の境界を、種々の条件においてしめたものである。境界線上においては、全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型 AlGaInN クラッド層中に含まれる全てのn型 AlGaN クラッド層、およびp型 AlGaN クラッド層の膜厚が $0.4\mu\text{m}$ 、混晶比が 0.08 となっており、n型 $\text{In}_s\text{Ga}_{1-s}\text{N}$ ガイド層およびp型 $\text{In}_t\text{Ga}_{1-t}\text{N}$ ガイド層の膜厚が $0.08\mu\text{m}$ となっている。また、実線101、102、103は、n型 $\text{In}_s\text{Ga}_{1-s}\text{N}$ ガイド層およびp型 $\text{In}_t\text{Ga}_{1-t}\text{N}$ ガイド層の In 混晶比を 0.02 とした場合の、（1）式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、実線101はAとBの境界、実線102はBとCの境界、実線103はCとDの境界を示している。また、破線104、105、106は、n型 $\text{In}_s\text{Ga}_{1-s}\text{N}$ ガイド層およびp型 $\text{In}_t\text{Ga}_{1-t}\text{N}$ ガイド層の In 混晶比を 0.04 とした場合の、（1）式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、破線104はAとBの境界、破線105はBとCの境界、破線106はCとDの境界を示している。また、点線107、108、109は、 $\text{In}_s\text{Ga}_{1-s}\text{N}$ ガイド層およびp型 $\text{In}_t\text{Ga}_{1-t}\text{N}$ ガイド層の In 混晶比を 0.06 とした場合の、（1）式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、点線107はAとBの境界、点線108はBとCの境界、点線109はCとDの境界を示している。

【0124】図11は、 InGaN 緩衝層とガイド層との距離が $0.4\mu\text{m}$ 以上あるような、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、（1）式を満たすようなn型 InGaN 緩衝層の In 混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、（1）式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードが InGaN 緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、 InGaN 緩衝層中において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再び InGaN 緩衝層に結合しやすい条件となるため、この範囲は避けるべきである。

【0125】線111から119は、（1）式を満たす

領域(A、C)と満たさない領域(B)の境界を、種々の条件においてしめたものである。境界線上においては、全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型AlGaInNクラッド層中に含まれる全てのn型AlGaInNクラッド層、およびp型AlGaInNクラッド層の膜厚が0.4μm、混晶比が0.08となっており、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層の膜厚が0.08μmとなっている。また、線111、112、113は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.07とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、線111はAとBの境界、線112はBとCの境界、線113はCとDの境界を示している。また、破線114、115、116は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.08とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、線114はAとBの境界、線115はBとCの境界、線116はCとDの境界を示している。また、点線117、118、119は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.09とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、線117はAとBの境界、線118はBとCの境界、線119はCとDの境界を示している。

【0126】図12は、InGaInN緩衝層とガイド層との距離が0.3~0.4μmの範囲にあるような、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、(1)式を満たすようなn型InGaInN緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、(1)式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードがInGaInN緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、InGaInN緩衝層において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再びInGaInN緩衝層に結合しやすい条件となるため、この範囲は避けるべきである。線121から129は、(1)式を満たす領域(A、C)と満たさない領域(B)の境界を、種々の条件においてしめたものである。境界線上においては、全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型AlGaInNクラッド層中に含まれる全てのn型AlGaInNクラッド層、およびp型AlGaInNクラッド層の膜厚が0.3μm、混晶比が0.08となっており、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層の膜厚が0.08μmとなっている。また、実線121、122、123は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.02とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、実線121は

AとBの境界、実線122はBとCの境界、実線123はCとDの境界を示している。また、破線124、125、126は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.04とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、破線124はAとBの境界、破線125はBとCの境界、破線126はCとDの境界を示している。また、点線127、128、129は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.06とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、点線127はAとBの境界、点線128はBとCの境界、点線129はCとDの境界を示している。

【0127】図13は、InGaInN緩衝層とガイド層との距離が0.3~0.4μmの範囲にあるような、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、(1)式を満たすようなn型InGaInN緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、(1)式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードがInGaInN緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、InGaInN緩衝層において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再びInGaInN緩衝層に結合しやすい条件となるため、この範囲は避けるべきである。線131から139は、(1)式を満たす領域(A、C)と満たさない領域(B)の境界を、種々の条件においてしめたものである。境界線上においては、全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型AlGaInNクラッド層中に含まれる全てのn型AlGaInNクラッド層、およびp型AlGaInNクラッド層の膜厚が0.3μm、混晶比が0.08となっており、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層の膜厚が0.08μmとなっている。また、実線131、132、133は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.07とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、実線131はAとBの境界、実線132はBとCの境界、実線133はCとDの境界を示している。また、破線134、135、136は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.08とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、134はAとBの境界、135はBとCの境界、136はCとDの境界を示している。また、点線137、138、139は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.09とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、137はAとBの境界、138はBとCの境界、139はCとDの境界を示して

いる。

【0128】図14は、InGa_N緩衝層とガイド層との距離が0.2~0.3μmの範囲にあるような、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、(1)式を満たすようなn型InGa_N緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、(1)式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードがInGa_N緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、InGa_N緩衝層中において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再びInGa_N緩衝層に結合しやすい条件となるため、この範囲は避けるべきである。

【0129】線141から149は、(1)式を満たす領域(A、C)と満たさない領域(B)の境界を、種々の条件においてしめたものである。境界線上においては、全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型AlGaInクラッド層に含まれる全てのn型AlGa_Nクラッド層、およびp型AlGa_Nクラッド層の膜厚が0.2μm、混晶比が0.08となっており、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層の膜厚が0.08μmとなっている。また、実線141、142、143は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.02とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、実線141はAとBの境界、実線142はBとCの境界、実線143はCとDの境界を示している。また、破線144、145、146は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.04とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、破線144はAとBの境界、破線145はBとCの境界、破線146はCとDの境界を示している。また、点線147、148、149は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.06とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、147はAとBの境界、148はBとCの境界、149はCとDの境界を示している。

【0130】図15は、InGa_N緩衝層とガイド層との距離が0.2~0.3μmの範囲にあるような、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、(1)式を満たすようなn型InGa_N緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものである。図において、領域Aおよび領域Cが、(1)式を満たす条件になっている。領域Bは、レーザ発振モードがInGa_N緩衝層に結合しやすい条件となっているため、この範囲は避けるべきである。また、領域Dは、InGa_N緩衝層中において1次以上の高次モードを生ずる条件になっており、レーザ発振モードが再びInGa_N緩衝層に結合しやすい条

件となるため、この範囲は避けるべきである。

【0131】線151から159は、(1)式を満たす領域(A、C)と満たさない領域(B)の境界を、種々の条件においてしめたものである。境界線上においては、全ての共通点として、本実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型AlGaInクラッド層に含まれる全てのn型AlGa_Nクラッド層、およびp型AlGa_Nクラッド層の膜厚が0.2μm、混晶比が0.08となっており、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層の膜厚が0.08μmとなっている。また、実線151、152、153は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.07とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、151はAとBの境界、152はBとCの境界、153はCとDの境界を示している。また、破線154、155、156は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.08とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、154はAとBの境界、155はBとCの境界、156はCとDの境界を示している。また、点線157、158、159は、n型In_sGa_{1-s}Nガイド層およびp型In_tGa_{1-t}Nガイド層のIn混晶比を0.09とした場合の、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界を示しており、157はAとBの境界、158はBとCの境界、159はCとDの境界を示している。

【0132】なお、図10~図15の計算結果は、簡単のために上下のInGa_Nガイド層を対称、即ち、n型ガイド層のIn混晶比をs、膜厚をd₁[μm]とし、p型ガイド層のIn混晶比をt、膜厚d₂[μm]としたとき、d₁=d₂、s=tとしたが、これが非対称であっても良く、この場合、上下ガイド層の平均厚さ、即ち(d₁+d₂)/2=dを、ガイド層膜厚と考えれば、図10~図15の関係はそのままほぼ同じであり、また、上下ガイド層の組成の加重平均、即ち(s·d₁+t·d₂)/(d₁+d₂)をガイドIn組成として考えれば、図10~図15の関係はそのままほぼ同じになる。但し、実用的には非対称をあまり大きくすると、活性層への光閉じ込めに悪影響を及ぼすので、そうならない範囲におのずから限定される。実用的には、-0.05≤s-t≤0.05が必要であり、特に好ましくは、-0.03≤s-t≤0.03であるべきである。また、実用的には、0.33≤d₁/d₂≤3が必要であり、特に好ましくは、0.56≤d₁/d₂≤1.8である。InGa_N緩衝層のIn混晶比をp₁、膜厚をt₁[nm]として、図10中の実線101は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (0.002182 + 0.2838 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -27.916 + 63$$

$$1.14p_1 + 418.94p_1^2$$

で近似できる。図10中の実線102は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (0.0006499 + 0.15812p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 10.467 + 180.02p_1 + 4603.7p_1^2$$

で近似できる。図10中の実線103は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -27.916 + 631.14p_1 + 418.94p_1^2 \quad 10$$

で近似できる。図10中の破線104は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.00057916 + 0.20257p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 20.248 - 212.49p_1 + 6390p_1^2$$

で近似できる。図10中の破線105は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0013694 + 0.16355p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 60.409 - 840.5p_1 + 10843p_1^2 \quad 20$$

で近似できる。図10中の破線106は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -27.916 + 631.14p_1 + 418.94p_1^2$$

で近似できる。図10および図11中の点線107は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0028164 + 0.16971p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 259.37 - 4759.8p_1 + 30608p_1^2 \quad 30$$

で近似できる。図10および図11中の点線108は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0025782 + 0.14902p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 345.07 - 6361.6p_1 + 39339p_1^2$$

で近似できる。図10および図11中の点線109は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -27.916 + 631.14p_1 + 418.94p_1^2 \quad 40$$

で近似できる。図11中の破線111は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0036588 + 0.15804p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 1192.2 - 22262p_1 + 112670p_1^2$$

で近似できる。図11中の破線112は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0035017 + 0.14571p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 524.75 - 1002 \quad 50$$

$$9p_1 + 59406p_1^2$$

で近似できる。図11中の破線113は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -27.916 + 631.14p_1 + 418.94p_1^2$$

で近似できる。図11中の太点線114は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.004347 + 0.14719p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 858.55 - 16866p_1 + 95186p_1^2$$

で近似できる。図11中の太点線115は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0041761 + 0.13916p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 958.16 - 18852p_1 + 105870p_1^2$$

で近似できる。図11中の太点線116は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -27.916 + 631.14p_1 + 418.94p_1^2$$

で近似できる。図11中の細点線117は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0052742 + 0.14125p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 2298 - 45941p_1 + 243280p_1^2$$

で近似できる。図11中の細い点線118は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.005134 + 0.1362p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 2497.8 - 49961p_1 + 264020p_1^2$$

で近似できる。図11中の細い点線119は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -27.916 + 631.14p_1 + 418.94p_1^2$$

で近似できる。図12中の実線121は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (0.0028147 + 0.32751p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -24.449 + 560.59p_1 + 222.45p_1^2 \quad 40$$

で近似できる。図12中の実線122は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (0.00054668 + 0.11697p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -57.468 + 1392.1p_1 + 1784.3p_1^2$$

で近似できる。図12中の実線123は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7p_1 - 2295.7p_1^2$$

で近似できる。図12中の破線124は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.000048081 + 0.22812 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 6.7893 + 7.0097 p_1 + 4779.4 p_1^2$$

で近似できる。図12中の破線125は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0011606 + 0.13789 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 81.043 - 1159.4 p_1 + 13537 p_1^2$$

で近似できる。図12中の破線126は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7 p_1 - 2295.7 p_1^2$$

で近似できる。図12および図13中の点線127は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0029727 + 0.18468 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 211.87 - 3874.3 p_1 + 25752 p_1^2$$

で近似できる。図12および図13中の点線128は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0024039 + 0.13561 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 410.2 - 7584.7 p_1 + 46101 p_1^2$$

で近似できる。図12および図13中の点線129は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7 p_1 - 2295.7 p_1^2$$

で近似できる。図13中の実線131は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0038108 + 0 - 16856 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 973.69 - 18186 p_1 + 93321 p_1^2$$

で近似できる。図13中の実線132は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0033291 + 0.13586 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 587.7 - 11264 p_1 + 66380 p_1^2$$

で近似できる。図13中の実線133は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7 p_1 - 2295.7 p_1^2$$

で近似できる。図13中の破線134は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0044872 + 0.15446 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 780.25 - 15299 p_1 + 86683 p_1^2$$

で近似できる。図13の破線135は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0040339 + 0.13236 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 1056.2 - 20815 p_1 + 116460 p_1^2$$

で近似できる。図13中の破線136は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7 p_1 - 2295.7 p_1^2$$

で近似できる。図13中の点線137は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0054023 + 0.14641 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 2088 - 41719 p_1 + 221580 p_1^2$$

で近似できる。図13中の点線138は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0049851 + 0.13106 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 2705.9 - 54159 p_1 + 285760 p_1^2$$

で近似できる。図13中の点線139は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -27.916 + 631.14 p_1 + 418.94 p_1^2$$

で近似できる。図14中の実線141は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (0.0039942 + 0.39645 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -21.331 + 488.13 p_1$$

で近似できる。図14中の実線142は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (0.0062727 + 0.05911 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -155.12 + 3494.3 p_1 - 1052.9 p_1^2$$

で近似できる。図14中の実線143は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7 p_1 - 2295.7 p_1^2$$

で近似できる。図14中の破線144は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.000076166 + 0.27608 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -4.9294 + 213.76 p_1 + 2827.4 p_1^2$$

で近似できる。図14の破線145は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.00076798 + 0.093666 p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 108.61 - 1511.6 p_1 + 19016 p_1^2$$

で近似できる。図14中の破線146は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)}, 0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7p_1 - 2295.7p_1^2$$

で近似できる。図14および図15中の点線147は、
 $p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0031947 + 0.21903p_1)^{(-1)},$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 139.37 - 2496.5p_1 + 17831p_1^2$$

で近似できる。図14および図15中の点線148は、
 $p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0018961 + 0.10494p_1)^{(-1)},$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 536.08 - 9966.9p_1 + 60707p_1^2$$

で近似できる。図14および図15中の点線149は、
 $p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7p_1 - 2295.7p_1^2$$

で近似できる。図15中の実線151は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (0.0040773 + 0.19547p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 539.75 + 10088p_1 + 547577p_1^2$$

で近似できる。図15中の実線152は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0028237 + 0.11113p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 766.52 - 14773p_1 + 86589p_1^2$$

で近似できる。図15中の実線153は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)}, 0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7p_1 - 2295.7p_1^2$$

で近似できる。図15中の破線154は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0048885 + 0.17591p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = -597.65 + 11661p_1 + 66983p_1^2$$

で近似できる。図15の破線155は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0035424 + 0.11285p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 1335.8 - 26428p_1 + 147260p_1^2$$

で近似できる。図15中の破線156は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7p_1 - 2295.7p_1^2$$

で近似できる。図15中の点線157は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0057371 + 0.1$$

$$6211p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 1533.6 - 30585p_1 + 164380p_1^2$$

で近似できる。図15中の点線158は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0044282 + 0.11446p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 3324.9 - 66656p_1 + 351050p_1^2$$

で近似できる。図15中の点線159は、

$$p_1 \leq 0.09 \text{ で } t_1 = (-0.0020902 + 0.031559p_1)^{(-1)},$$

$$0.09 \leq p_1 \leq 0.2 \text{ で } t_1 = 40.78 + 1986.7p_1 - 2295.7p_1^2$$

で近似できる。

【0133】実際に半導体レーザ素子を作製する時は、InGa_N緩衝層の膜厚およびIn混晶比が(1)式を満たす領域、即ちAまたはCの領域に入るよう考慮して設計するが、(1)式を満たす領域と満たさない領域の境界線から十分離れた領域に相当する値をとることが望ましい。

【0134】また、本発明者らの実験によると、InGa_N緩衝層を200nm以上積層すると、その上に積層された半導体層の結晶性が悪化した。また、In混晶比が0.2以上のInGa_N緩衝層を積層すると、その上に積層された半導体層の結晶性が悪化した。このことから、InGa_N緩衝層の膜厚は200nm以下、In混晶比は0.2以下とするのがよい。さらに、InGa_N緩衝層は僅かにInを含む程度(In混晶比が0.001以下のとき)でもクラック防止の効果が発生し、In混晶比を変化させてもクラック防止効果の度合いはほとんど変わらなかった。また、InGa_N緩衝層はわずかな膜厚(膜厚10nm以下)でもクラック防止の効果が発生し、In混晶比を変化させてもクラック防止効果の度合いはほとんど変わらなかった。

【0135】以上より、本実施の形態における半導体レーザ素子において、InGa_N緩衝層とガイド層との距離が(A)0.4μm以上のとき、(B)0.3μm以上0.4μm未満のとき、(C)0.2μm以上0.3μm未満のときと場合分けし、また、それぞれの場合において、ガイド層のIn混晶比が(a)0 ≤ s = t < 0.02のとき、(b)0.02 ≤ s = t < 0.04のとき、(c)0.04 ≤ s = t < 0.06のとき、(d)0.06 ≤ s = t < 0.07のとき、(e)0.07 ≤ s = t < 0.08のとき、と場合分けして、InGa_N緩衝層のIn混晶比をp₁、膜厚をt₁ [nm]としたとき、(p₁, t₁)が満たすべき領域は、およそ、(A) InGa_N緩衝層とガイド層との距離が0.4μm以上のとき、(a) 0 ≤ s = t < 0.02のときは10 ≤ t₁ ≤ (0.002182 + 0.2838p₁)⁽⁻¹⁾かつt₁ ≤ 200かつ0.001 ≤ p₁ ≤ 0.09

または

$$10 \leq t_1 \leq -27.916 + 631.14 p_1 + 41.8.94 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

2

$$60.409 - 840.5 p_1 + 10843 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (7)$$

(b) $0.02 \leq s = t < 0.04$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (-0.00057916 + 0.20257 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 20.248 - 212.49 p_1 + 6390 \times 345.07 - 6361.6 p_1 + 39339 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (8)$$

(c) $0.04 \leq s = t < 0.06$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq -0.0036588 + 0.15804 p_1 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 1192.2 - 22262 p_1 + 11267 \star 20 \quad 524.75 - 10029 p_1 + 59406 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (9)$$

(d) $0.06 \leq s = t < 0.07$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (-0.0036588 + 0.15804 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 1192.2 - 22262 p_1 + 11267 \star \quad 958.16 - 18852 p_1 + 105870 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (10)$$

(e) $0.07 \leq s = t \leq 0.10$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (-0.004347 + 0.14719 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 858.55 - 16866 p_1 + 95186 \diamond \quad 2497.8 - 49961 p_1 + 264020 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (11)$$

の領域内であることが判る。

(B) InGaN緩衝層とガイド層との距離が $0.3 \mu\text{m}$ 以上 $0.4 \mu\text{m}$ 未満のとき

(a) $0 \leq s = t < 0.02$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (0.0028147 + 0.32751 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$81.043 - 1159.4 p_1 + 13537 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (13)$$

(b) $0.02 \leq s = t < 0.04$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (-0.000048081 + 0.228 \quad 12 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

*または

$$(-0.0013694 + 0.16355 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

* または

$$\star p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.0025782 + 0.14902 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$\star 0 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.0035017 + 0.14571 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$\star 0 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.0041761 + 0.13916 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$\diamond p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.005134 + 0.1362 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$\star 10 \leq t_1 \leq -24.449 + 560.59 p_1 + 22.45 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.0011606 + 0.13789 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

*

$$12 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 6.7893 + 7.0097 p_1 + 477$$

$$9.4 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$410.2 - 7584.7 p_1 + 46101 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (14)$$

(c) $0.04 \leq s = t < 0.06$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (-0.0029727 + 0.18468 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 211.87 - 3874.3 p_1 + 2575 \times 587.7 - 11264 p_1 + 66380 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (15)$$

(d) $0.06 \leq s = t < 0.07$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (-0.0038108 + 0.16856 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 973.69 - 18186 p_1 + 93321 \star 20$$

$$1056.2 - 20815 p_1 + 116460 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (16)$$

(e) $0.07 \leq s = t \leq 0.10$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (-0.0044872 + 0.15446 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 780.25 - 15299 p_1 + 86683 \star$$

$$2705.9 - 54159 p_1 + 285760 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (17)$$

の領域内であることが判る。

(C) InGaN 緩衝層とガイド層との距離が $0.2 \mu\text{m}$ 以上 $0.3 \mu\text{m}$ 未満のとき(a) $0 \leq s = t < 0.02$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (0.0039942 + 0.39645 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

$$108.61 - 1511.6 p_1 + 19016 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (19)$$

(b) $0.02 \leq s = t < 0.04$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (-0.000076166 + 0.27608 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq -4.9294 + 213.76 p_1 + 282 \times 536.08 - 9966.9 p_1 + 60707 p_1^2 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2 \quad (20)$$

(c) $0.04 \leq s = t < 0.06$ のときは

$$10 \leq t_1 \leq (-0.0031947 + 0.21903 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

$$\star (-0.0024039 + 0.13561 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$\star 2 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.0033291 + 0.13586 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

$$10 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$\star p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.0040339 + 0.13236 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

$$t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$\star p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.0049851 + 0.13106 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

$$t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

◆または

$$10 \leq t_1 \leq -21.331 + 488.13 p_1 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.00076798 + 0.093666 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

$$(-1) \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

◆ または

$$40 \star 7.4 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$(-0.0018961 + 0.10494 p_1) \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

$$t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.001 \leq p_1 \leq 0.09$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

または

$$10 \leq t_1 \leq 139.37 - 2496.5 p_1 + 1783$$

$$1 p_1^2 \text{ かつ } t_1 \leq 200 \text{ かつ } 0.09 < p_1 \leq 0.2$$

50 または

$(-0.0028237 + 0.11113 p_1)^{(-1)} \leq$ *または
 $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$ *

$766.52 - 14773 p_1 + 86589 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$ (21)

(d) $0.06 \leq s = t < 0.07$ のときは
 $10 \leq t_1 \leq (-0.0040773 + 0.19547 p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$10 \leq t_1 \leq 539.75 - 10088 p_1 + 54757 \times 10$

$1335.8 - 26428 p_1 + 147260 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$ (22)

(e) $0.07 \leq s = t \leq 0.10$ のときは
 $10 \leq t_1 \leq (-0.0048885 + 0.17591 p_1)^{(-1)}$ かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

$10 \leq t_1 \leq 597.65 - 11661 p_1 + 66983 \star$

$3324.9 - 66656 p_1 + 351050 p_1^2 \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$ (23)

の領域内であることが判る。上記範囲は、レーザ発振の中心波長が370~430nm(20℃)の範囲で計算しても、またInGa_{1-x}N緩衝層とガイド層との間に介装されるAlGa_{1-x}Nクラッド層の混晶比を0.08から0.2の範囲で計算しても、同じであった。

【0136】本実施の形態の半導体レーザ素子の作製方法に記載したInGa_{1-x}N緩衝層の例として挙げた膜厚は50nm、混晶比は0.02であり、上記範囲内に含まれている。

【0137】上記範囲中の(e)の範囲内において、 $0.09 \leq s = t \leq 0.10$ の範囲内におけるIn_{0.9}Ga_{0.1}N(またはIn_{0.9}Ga_{0.1}-tN)の屈折率変化範囲は、 $0.08 \leq s = t \leq 0.09$ の範囲内におけるIn_{0.8}Ga_{0.2}N(またはIn_{0.8}Ga_{0.2}-tN)の屈折率変化範囲とほぼ等価であるため、 $0.09 \leq s = t \leq 0.10$ の範囲内における計算結果は、 $0.08 \leq s = t \leq 0.09$ の範囲内における計算結果とほぼ一致するため、まとめて $0.08 \leq s = t \leq 0.10$ の範囲内における計算結果として示した。

【0138】良好な光学特性を得るための、InGa_{1-x}N緩衝層のIn組成 p_1 および膜厚 t_1 は、上記領域に限定されるが、次のような要請から、InGa_{1-x}N緩衝層の好ましい範囲はさらに制限される。p型クラッド層内ないしn型クラッド層内に介装されるInGa_{1-x}N緩衝層における吸収は、レーザ発振モードの吸収を引き起こし、閾値電流密度の増加を招くため、InGa_{1-x}N緩衝層における吸収係数は、小さい方がより望ましい。InGa_{1-x}N緩衝層のIn組成を大きくすると、InGa_{1-x}N緩衝層におけるレーザ発振モードの吸収が大きくなるため、InGa_{1-x}N緩衝層のIn組成は大きすぎない方がよい。このた

* p_1^2 かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$(-0.0035424 + 0.11285 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

★ p_1^2 かつ $t_1 \leq 200$ かつ $0.09 < p_1 \leq 0.2$

または

$(-0.0044282 + 0.11446 p_1)^{(-1)} \leq t_1 \leq 200$ かつ $0.001 \leq p_1 \leq 0.09$

または

め、さらに望ましくは上記範囲の制限に加えて、 $p_1 \leq 0.09$ という条件を付加した方がよい。

【0139】本実施の形態で作製したレーザ素子のほとんど全てが発振し、発振の閾値電圧(V_{op})が約5V、閾値電流密度(J_{th})が 1.5 kA/cm^2 であった。また、従来の半導体レーザは、連続して10時間以上発振を継続させていると、光出力が急激に低下する現象が生じてきたが、n型AlGa_{1-x}Nクラッド層中にn型InGa_{1-x}N緩衝層を挿入した本実施例に示すレーザは、約1000時間経過しても、特性の変化は見られなかった。また、FFPは単峰であり、良好な光学特性が実現できた。

【0140】なお、本実施の形態においては、n型AlGa_{1-x}Nクラッド層中に含まれるn型AlGa_{1-x}Nクラッド層、およびp型AlGa_{1-x}NにおけるAl混晶比は必ずしも全て同じである必要はなく、その際においても前記Fなるパラメータが(1)式を満たすように設計されたInGa_{1-x}N緩衝層をn型AlGa_{1-x}Nクラッド層中に含む構造を有する半導体レーザ素子であれば、本発明の効果は発生する。しかし、レーザ発振モードの対称性を考慮すれば、半導体レーザ素子構造中におけるAlGa_{1-x}Nクラッド層のAl混晶比は全て同一にすることが望ましい。

【0141】また、本実施の形態において、活性層は3重量子井戸としたが、2層または4層以上の多重量子井戸にしても、本発明において必要とされる関係式(1)およびInGa_{1-x}N緩衝層に関して必要とされる関係式は変わらず、発生する効果は同じであった。

【0142】なお、本実施の形態における半導体レーザの構造でn型AlGa_{1-x}Nクラッド層とn型Ga_{1-x}N

ンタクト層の間に介装されるn型 $\text{In}_r\text{Ga}_{1-r}\text{N}$ 緩衝層は、半導体多層成長膜のクラックをさらに減少させる効果を有するが、なくても本発明の請求範囲に含まれるものであり、半導体レーザ素子の活性層閉じ込め係数およびFFPにはほとんど影響を与えない。

【0143】また、本実施の形態における半導体レーザ素子に用いた基板は、サファイアを用いたが、他の基板でも良く、たとえばGa₂N基板でもよい。この場合、AlGaInNクラッド層中に介装されるInGa₂N緩衝層の混晶比および膜厚が満たすべき条件の範囲は、サファイア基板の場合と同じであった。

【0144】(実施の形態3) 図16は、本発明の第3の実施の形態を示す半導体レーザ素子の模式図である。図は、半導体レーザの導波路部分の共振器に垂直な断面を示している。本半導体レーザ素子は、(0001)C面サファイア基板1(膜厚30~300μm)、Ga₂N低温バッファ層2(膜厚0~100nm)、n型Ga₂Nコンタクト層3(膜厚0.1~10μm)、n型 $\text{In}_r\text{Ga}_{1-r}\text{N}$ ($0 \leq r \leq 0.2$)緩衝層41(膜厚0~200nm)、n型 $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ ($0.08 \leq x1 \leq 0.2$)クラッド層4(膜厚0.2~0.8μm)とn型 $\text{In}_{p1}\text{Ga}_{1-p1}\text{N}$ ($0.001 \leq p1 \leq 0.2$)緩衝層5(膜厚10~200nm)の交互積層構造(n型AlGa₂Nクラッド層/n型InGa₂N緩衝層/.../n型InGa₂N緩衝層/n型AlGa₂Nクラッド層)からなるn型AlGaInNクラッド層15(総膜厚0.6~10μm、但し本実施の形態においては、n型AlGa₂Nクラッド層は、n型InGa₂N緩衝層を介して3段以上成長するものとする)、n型Ga₂Nガイド層6(膜厚0.08~0.15μm)、 $\text{In}_v\text{Ga}_{1-v}\text{N}$ ($0 < v < 0.2$)井戸層と $\text{In}_v\text{Ga}_{1-v}\text{N}$ ($0 < v < w$)障壁層との交互多層構造(障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層)からなる多重量子井戸活性層7(発光波長370~430nm、総膜厚5~60nm)、p型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ ($0 \leq z \leq 0.3$)キャリアブロック層8(膜厚0~20nm)、p型Ga₂Nガイド層9(膜厚0.08~0.15μm)、p型 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($0.08 \leq y \leq 0.2$)クラッド層10(膜厚0.2~0.8μm)、p型Ga₂Nコンタクト層11(膜厚0.01~10μm)の各窒化物系半導体層が形成されている。

【0145】その上には、必要な形状の絶縁膜12が、メサ上の概略全面に形成されている。正電極13(たとえば、Pd/Au、Ni/Pd/Au、Pd/Pt/Au等)は、p型Ga₂Nコンタクト層の一部露出した面上の全面を含む、メサ状の概略全面に形成されている。負電極14(たとえば、Ti/Al、Zr/Al、Hf/Alなど)は、n型Ga₂Nコンタクト層の一部露出した面上に形成されている。メサは、n型Ga₂Nコンタクト層、n型InGa₂N緩衝層、n型AlGaInNクラッド層、n型Ga₂Nガイド層、InGa₂N多重量子井戸活

性層、p型AlGa₂Nキャリアブロック層、p型Ga₂Nガイド層、p型AlGa₂Nクラッド層、p型Ga₂Nコンタクト層、絶縁膜(但し前記絶縁膜は必要領域のみ)、正電極より構成されている。ストライプの両端面はミラーとして働き、光共振器を構成している。

【0146】次に、本実施の形態における半導体レーザの製造方法について述べる。まず、(0001)C面サファイア基板を洗浄する。洗浄した(0001)C面サファイア基板をMOCVD装置内に導入し、H₂雰囲気の中で、約1100℃の高温でクリーニングを行う。その後、降温して、キャリアガスとして水素(H₂)を10リットル/min流しながら、600℃でNH₃とトリメチルガリウム(TM₂G)をそれぞれ5リットル/min、20mol/min導入して、0~100nm(たとえば約20nm)の厚みのGa₂N低温バッファ層を成長する。低温バッファ層としては、Ga₂Nに限らず、トリメチルアルミニウム(TMA)、TMG、NH₃を使用して、AlN膜やGaAlN膜を用いてもなんら影響はない。

【0147】次に、N₂とNH₃をそれぞれ5リットル/min流しながら約1050℃まで昇温する。温度が上がれば、キャリアガスをN₂からH₂に代えて、TMGを100μmol/min、SiH₄を10nmol/min導入して、n型Ga₂Nコンタクト層を0.1~10μm(たとえば約4μm)成長する。次に、TMGの供給を停止して、キャリアガスをH₂からN₂に再び代えて、約800℃まで降温後、TMGを15μmol/minに調整し、インジウム原料であるトリメチルインジウム(TMI)を一定量流しながら、 $\text{In}_r\text{Ga}_{1-r}\text{N}$ 緩衝層(たとえば $r=0.07$)を0~200nm(たとえば50nm)成長する。次に、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再びN₂からH₂に代えて、TMGの流量を50μmol/minに調整し、TMAを40μmol/min導入して、n型の $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$ クラッド層(たとえば $x1=0.1$)を0.2~0.8μm(たとえば0.5μm)の厚さで成長する。

【0148】次に、TMGおよびTMAの供給を停止して、キャリアガスをH₂からN₂に再び代えて、約800℃まで降温後、TMGを15μmol/minに調整し、TMIを一定量流しながら、 $\text{In}_{p1}\text{Ga}_{1-p1}\text{N}$ 緩衝層(たとえば $p1=0.02$)を10~200nm(たとえば50nm)成長する。次に、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再びN₂からH₂に代えて、TMGの流量を50μmol/minに調整し、TMAを40μmol/min導入して、n型の $\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2}\text{N}$ クラッド層(たとえば $x2=0.1$)を0.2~0.8μm(たとえば0.5μm)の厚さで成長する。n型InGa₂N緩衝層

は合計k層、同様の手法で成長を行い、n型InGa₂N

緩衝層とn型InGa_N緩衝層との間および両側には合計k+1層のn型AlGa_Nクラッド層が存在するようなn型AlGa_Nクラッド層を成長する。n型AlGa_Nクラッド層の成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGを100μmol/minに調整して、n型Ga_Nガイド層を0.08~0.15μm(たとえば0.1μm)の厚さになるように成長する。その後、TMGの供給を停止して、キャリアガスをH₂からN₂に再び代えて、700℃まで降温し、インジウム原料であるトリメチルインジウム(TMI)を10μmol/min、TMGを15μmol/min導入し、In_vGa_{1-v}N(たとえばv=0.05)よりなるたとえば4nm厚の障壁層を成長する。その後、TMIの供給を50μmol/minに増加し、In_wGa_{1-w}N(たとえばw=0.17)よりなるたとえば2nm厚の井戸層を成長する。たとえば、井戸層は合計3層、同様の手法で成長を行い、井戸層と井戸層との間および両側には合計4層の障壁層が存在するような発光波長380~430nm(たとえば400~410nm)の多重量子井戸(MQW)を成長する。MQWの成長が終了すると、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再びN₂からH₂に代えて、TMGを50μmol/min、TMAを30μmol/min、p型ドーピング原料であるビスシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp₂Mg)を10nmol/min流し、0~20nm(たとえば20nm)厚のp型Al_zGa_{1-z}N(たとえばz=0.2)キャリアブロック層を成長する。キャリアブロック層の成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGの供給量を100μmol/minに調整して、0.08~0.15μm(たとえば0.1μm)の厚さのp型Ga_Nガイド層を成長する。その後、TMGの供給を50μmol/minに調整し、TMAを40μmol/min導入し、0.2~0.8μm(たとえば0.5μm)厚のp型Al_yGa_{1-y}Nクラッド層(たとえばy=0.1)を成長する。最後に、TMGの供給を100μmol/minに調整して、TMAの供給を停止し、0.01~10μm(たとえば0.1μm)厚のp型Ga_Nコンタクト層の成長を行い発光素子構造の成長を終了する。成長が終了すると、TMGおよびCp₂Mgの供給を停止して降温し、室温でMOCVD装置より取り出す。

【0149】本レーザ構造を有する膜の最表面(成長終端面)の表面粗さの平均値(Ra)は約10nmであり、大変良好な平坦性を示した。また、(0001)C面サファイア基板、Ga_N低温バッファ層(膜厚20nm)、n型Ga_Nコンタクト層(膜厚約4μm)、n型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層(膜厚0.5μm)、n型In_{0.03}Ga_{0.97}N緩衝層(膜厚50nm)、n型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層(膜厚0.5μm)なる構造を有するウェハーを複数枚作製し、表面を光学顕微鏡で約

200倍に拡大して観察したところ、全てのウェハーにおいて六角形のクラックは確認されなかった。このウェハーにおいて、n型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層の膜厚合計は約1μmであった。従来の技術における課題が解消されたのは、n型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層中に少なくともInを含む緩衝層が形成されたことによる効果に他ならない。その後、フォトリソグラフィ技術および反応性イオンエッチング技術を用い、p型Ga_Nコンタクト層を3μm幅のストライプ状に残して、p型Al_yGa_{1-y}Nクラッド層までエッチングを行い、光導波路を形成した後、フォトリソグラフィ技術を用いてp型Ga_Nコンタクト層が電極と接触する部分を除いて絶縁膜を形成する。その後、反応性イオンエッチング技術を用いて、ウェハ最表面よりn型Ga_Nコンタクト層の途中まで、負電極を形成する部分を除去する。その後、メサ状のp型Ga_Nコンタクト層の一部露出した面上に、正電極を形成する。電極材料としては、たとえばAu/NiあるいはAu/Pdを用いれば良い。また、n型Ga_Nコンタクト層の一部露出した面上の概略全面に、負電極を形成する。負電極材料としては、たとえばAl/TiあるいはAu/Wを用いれば良い。

【0150】最後に、サファイア基板の半導体多層膜面と相反する面側を研磨することにより、半導体多層膜面およびサファイア基板を含めた層厚が30~300μm(たとえば約60μm)となるようにする。その後、劈開を用いて素子長が約0.5mmとなるようにして、ミラーとなる端面を形成した。

【0151】以上により、図16に示す第3の実施の形態の半導体レーザ素子が作製できる。

【0152】本実施の形態における半導体レーザ素子において、n型AlGa_Nクラッド層中に介装された、複数のn型InGa_N緩衝層の膜厚およびIn混晶比は、レーザ発振モードがn型InGa_N緩衝層と、その近隣層であるn型AlGa_Nクラッド層で構成される3層スラブ導波路に結合しない条件式(1)が成り立つように設計されている。より具体的には、n型AlGa_Nクラッド層中にn型InGa_N緩衝層が合計2層以上介装されているとすると、n型AlGa_Nクラッド層(膜厚は無有限大)/n型Ga_Nガイド層/InGa_N多重量子井戸活性層/p型AlGa_Nキャリアストップ層/p型Ga_Nガイド層/p型AlGa_Nクラッド層(膜厚は無有限大)で構成される多層スラブ導波路に生じる導波モード(等価屈折率 n_{eq} 、電界振幅 $f_{eq}(x)$)と、i番目($i=1, 2, \dots$)のn型InGa_N緩衝層をコアとする3層スラブ導波路(n型AlGa_Nクラッド層(膜厚は無有限大)/n型InGa_N緩衝層/n型AlGa_Nクラッド層(膜厚は無有限大))に生じる導波モード(等価屈折率 n_i 、電界振幅 $f_i(x)$)とを考えることにより計算されるパラメータFが、(1)式を満たすようにi番目のn型InGa_N緩衝層のIn混晶

比および膜厚が設定されている。n型AlGaInクラッド層内に存在するInGaIn緩衝層のうち、上記条件を満たす層が少なくとも1層あれば、FFPにおけるリップルの抑制、および活性層への閉じ込め係数の向上という効果が発生するが、全てのInGaIn緩衝層が上記条件を満たしていることが望ましい。

【0153】(1)式を満たすInGaIn緩衝層の混晶比および膜厚の範囲は、図5～図8より求まる範囲と同一であった。

【0154】本実施の形態で作製したレーザ素子のほとんど全てが発振し、発振の閾値電圧(V_{op})が約5V、閾値電流密度(J_{th})が 1.2 kA/cm^2 であった。また、従来の半導体レーザでは、クラックがない素子においても、連続して10時間以上発振を継続させていると、光出力が急激に低下する現象が生じてきたが、n型AlGaInクラッド層中にn型InGaIn緩衝層を挿入した本実施例に示すレーザは、約1000時間経過しても、特性の変化は見られなかった。また、FFPは単峰であり、良好な光学特性が実現できた。

【0155】なお、本実施の形態においては、n型AlGaInNクラッド層中に含まれるn型AlGaInクラッド層、およびp型AlGaInにおけるAl混晶比は必ずしも全て同じである必要はなく、その際においても前記Fなるパラメータが(1)式を満たすように設計されたInGaIn緩衝層をn型AlGaInNクラッド層中に含む構造を有する半導体レーザ素子であれば、本発明の効果は発生する。しかし、レーザ発振モードの対称性を考慮すれば、半導体レーザ素子構造中におけるAlGaInクラッド層のAl混晶比は全て同一にすることが望ましい。

【0156】また、本実施の形態において、活性層は3重量子井戸としたが、2層または4層以上の多重量子井戸にしても、本発明において必要とされる関係式(1)およびInGaIn緩衝層に関して必要とされる関係式は変わらず、発生する効果は同じであった。

【0157】また、本実施の形態において、ガイド層はGaInとしたが、InGaInガイド層にしても、本発明において必要とされる関係式(1)およびInGaIn緩衝層に関して必要とされる関係式は図10～15に示したものと変わらず、発生する効果は同じであった。

【0158】なお、本実施の形態における半導体レーザの構造でn型AlGaInNクラッド層とn型GaInコンタクト層の間に介装されるn型InGaIn緩衝層は、半導体多層ウェハのクラックをさらに減少させる効果を有するが、なくても本発明の請求範囲に含まれるものであり、半導体レーザ素子の活性層閉じ込め係数およびFFPにはほとんど影響を与えない。

【0159】また、本実施の形態における半導体レーザ素子に用いた基板は、サファイアを用いたが、他の基板でも良く、たとえばGaIn基板でもよい。この場合、A

lGaInNクラッド層中に介装されるInGaIn緩衝層の混晶比および膜厚が満たすべき条件の範囲は、サファイア基板の場合と同じであった。

【0160】(実施の形態4)図17は、本実施の形態における半導体レーザ素子を示す模式図である。図は、半導体レーザの導波路部分の共振器に垂直な断面を示している。本半導体レーザ素子は、(0001)C面サファイア基板1(膜厚 $30\sim300\mu\text{m}$)、GaIn低温バッファ層2(膜厚 $0\sim100\text{nm}$)、n型GaInコンタクト層3(膜厚 $0.1\sim10\mu\text{m}$)、n型AlGaInN($0.08\leq x\leq 0.2$)クラッド層4(膜厚 $0.2\sim0.8\mu\text{m}$)とn型InGaIn($0.001\leq p\leq 0.2$)緩衝層5(膜厚 $10\sim200\text{nm}$)との交互多層構造(n型クラッド層/n型緩衝層/.../n型緩衝層/n型クラッド層)からなるn型AlGaInNクラッド層15(総膜厚 $0.8\sim10\mu\text{m}$)、n型GaInガイド層6(膜厚 $0.08\sim0.15\mu\text{m}$)、InGaIn($0<w<0.2$)井戸層とInGaIn($0<v<w$)障壁層との交互多層構造(障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層)からなる多重量子井戸活性層7(発光波長 $370\sim430\text{nm}$ 、総膜厚 $5\sim60\text{nm}$)、p型AlGaInN($0\leq z\leq 0.3$)キャリアブロック層8(膜厚 $0\sim20\text{nm}$)、p型GaInガイド層9(膜厚 $0.08\sim0.15\mu\text{m}$)、p型AlGaInN($0.08\leq y\leq 0.2$)クラッド層10(膜厚 $0.2\sim0.8\mu\text{m}$)とp型InGaIn($0.001\leq q\leq 0.2$)緩衝層171(膜厚 $10\sim200\text{nm}$)との交互多層構造(p型クラッド層/p型緩衝層/.../p型緩衝層/p型クラッド層)からなるp型AlGaInNクラッド層172(層膜厚 $0.8\sim10\mu\text{m}$)、p型GaInコンタクト層11(膜厚 $0.01\sim10\mu\text{m}$)の各窒化物系半導体層が形成されている。

【0161】その上には、必要な形状の絶縁膜12が、メサ上の概略全面に形成されている。正電極13(たとえば、Pd/Au、Ni/Pd/Au、Pd/Pt/Au等)は、p型GaInコンタクト層の一部露出した面上の全面を含む、メサ状の概略全面に形成されている。負電極14(たとえば、Ti/Al、Zr/Al、Hf/Alなど)は、n型GaInコンタクト層の一部露出した面上に形成されている。メサは、n型GaInコンタクト層、n型InGaIn緩衝層、n型AlGaInNクラッド層、n型GaInガイド層、InGaIn多重量子井戸活性層、p型AlGaInNキャリアブロック層、p型AlGaInクラッド層、p型GaInコンタクト層、絶縁膜(但し前記絶縁膜は必要領域のみ)、正電極より構成されている。ストライプの両端面はミラーとして働き、光共振器を構成している。

【0162】次に、本実施の形態における半導体レーザの製造方法について述べる。まず、(0001)C面サファイア基板を洗浄する。洗浄した(0001)C面サ

ファイア基板をMOCVD装置内に導入し、 H_2 雰囲気の中で、約1100℃の高温でクリーニングを行う。その後、降温して、キャリアガスとして水素(H_2)を10リットル/min流しながら、600℃で NH_3 とトリメチルガリウム(TMg)をそれぞれ5リットル/min、20mol/min導入して、0~100nm(たとえば20nm)の厚みのGa_{0.9}N低温バッファ層を成長する。低温バッファ層としては、Ga_{0.9}Nに限らず、トリメチルアルミニウム(TMA)、TMG、 NH_3 を使用して、Al_{0.9}N膜やGaAlN膜を用いてもなんら影響はない。

【0163】次に、 N_2 と NH_3 をそれぞれ5リットル/min流しながら約1050℃まで昇温する。温度が上がれば、キャリアガスを N_2 から H_2 に代えて、TMGを100μmol/min、 SiH_4 を10nmol/min導入して、n型Ga_{0.9}Nコンタクト層を0.1~10μm(たとえば約4μm)成長する。次に、TMGの流量を50μmol/minに調整し、TMAを一定量導入して、n型のAl_{x1}Ga_{1-x1}N(たとえばx₁=0.1)クラッド層を0.2~0.8μm(たとえば0.5μm)の厚さで成長する。次に、TMGおよびTMAの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、約800℃まで降温後、TMGを15μmol/minに調整し、TMIを一定量流しながら、In_pGa_{1-p}N(たとえばp=0.02)緩衝層を0~200nm成長する。次に、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に代えて、TMGの流量を50μmol/minに調整し、TMAを一定量導入して、n型のAl_{x2}Ga_{1-x2}N(たとえばx₂=0.1)クラッド層を0.2~0.8μmの厚さで成長する。このn型AlGa_{0.9}N層とn型InGa_{0.9}N層とを繰り返し成長し、n型AlGa_{0.9}N緩衝層とn型InGa_{0.9}N緩衝層との交互多層構造(n型クラッド層/n型緩衝層/.../n型緩衝層/n型クラッド層)からなるn型AlGaInNクラッド層を総膜厚0.8~10μm成長する。AlGaInNの成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGを100μmol/minに調整して、n型Ga_{0.9}Nガイド層を0.08~0.15μmの厚さになるように成長する。その後、TMGの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、700℃まで降温し、インジウム原料であるトリメチルインジウム(TMI)を一定量、TMGを15μmol/min導入し、In_vGa_{1-v}N(たとえばv=0.05)よりなる障壁層を成長する。その後、TMIの供給をある一定量にまで増加し、In_wGa_{1-w}N(たとえばw=0.17)よりなる井戸層を成長する。このInGa_{0.9}N障壁層とInGa_{0.9}N井戸層との交互多層構造(障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層)からなる多重量子井戸(MQW)活性層を成長する。障壁層および井戸層を形成するInGa_{0.9}N

の混晶比および膜厚は、発光波長が370~430nm(たとえば400~410nm)の範囲になるように設計し、成長時に導入するTMIの流量は、その設計値に等しいIn組成の膜が得られるように調節する。

【0164】MQW活性層の成長が終了すると、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に代えて、TMGを50μmol/min、TMAを適量、p型ドーピング原料であるビスシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp₂Mg)を10nmol/min流し、0~20nm厚(たとえば20nm)のp型Al_{0.9}Ga_{0.1}N(たとえばz=0.3)キャリアブロック層を成長する。キャリアブロック層の成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGの供給量を100μmol/minに調整して、0.08~0.15μm(たとえば0.1μm)の厚さのp型Ga_{0.9}Nガイド層を成長する。

【0165】次に、TMGの供給を50μmol/minに調整し、TMAを一定量導入し、0.2~0.8μm厚のp型Al_{y1}Ga_{1-y1}N(たとえばy₁=0.1)クラッド層を成長する。次に、TMGおよびTMAおよびCp₂Mgの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に換えて、約800℃まで降温後、TMGを15μmol/minに調整し、TMIを一定量流しながら、p型In_qGa_{1-q}N(たとえばq=0.02)緩衝層を0~200nm(たとえば50nm)成長する。次に、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に変えて、TMGの流量を50μmol/minに調整し、TMAを一定量導入して、p型Al_{y2}Ga_{1-y2}N(たとえばy₂=0.1)クラッド層を0.2~0.8μm(たとえば0.5μm)の厚さで成長する。このp型AlGa_{0.9}N層とn型InGa_{0.9}N層とを繰り返し成長し、p型AlGa_{0.9}N緩衝層とp型InGa_{0.9}N緩衝層との交互多層構造(p型クラッド層/p型緩衝層/.../p型緩衝層/p型クラッド層)からなるp型AlGaInNクラッド層を総膜厚0.8~10μm(たとえば約1μm)成長する。AlGaInNの成長が終了すると、TMAの供給を停止し、最後に、TMGの供給を100μmol/minに調整して、0.01~10μm厚のp型Ga_{0.9}Nコンタクト層の成長を行い発光素子構造の成長を終了する。成長が終了すると、TMGおよびCp₂Mgの供給を停止して降温し、室温でMOCVD装置より取り出す。

【0166】本レーザ構造を有する膜の最表面(成長終端面)の表面粗さの平均値(Ra)は約10nmであり、大変良好な平坦性を示した。また、(0001)C面サファイア基板、Ga_{0.9}N低温バッファ層、n型Ga_{0.9}Nコンタクト層、n型AlGa_{0.9}Nクラッド層とn型InGa_{0.9}N緩衝層との交互多層構造(n型クラッド層/n型緩衝層/.../n型緩衝層/n型クラッド層)からなる

n型AlGaInNクラッド層（層膜厚約1 μ m）で構成された構造を有するウェハを複数枚作製し、表面を光学顕微鏡で約200倍に拡大して観察したところ、全てのウェハにおいて六角形のクラックはほとんど確認されなかった。より具体的には、10枚のウェハの内ウェハの周辺で六角形のクラックが発生しているウェハは1枚だけであった。従来の技術における課題が解消されたのは、In'を含む緩衝層を介装してn型AlGaInNクラッド層を多段成長したことによる効果に他ならない。

【0167】その後、フォトリソグラフィ技術および反応性イオンエッチング技術を用い、p型GaNコンタクト層を3 μ m幅のストライプ状に残して、p型AlGaInNクラッド層までエッチングを行い、光導波路を形成した後、フォトリソグラフィ技術を用いてp型GaNコンタクト層が電極と接触する部分を除いて絶縁膜を形成する。その後、反応性イオンエッチング技術を用いて、ウェハ最表面よりn型GaNコンタクト層の途中まで、負電極を形成する部分を除去する。その後、メサ状のp型GaNコンタクト層の一部露出した面上に、正電極を形成する。電極材料としては、たとえばAu/NiあるいはAu/Pdを用いれば良い。また、n型GaNコンタクト層の一部露出した面上の概略全面に、負電極を形成する。負電極材料としては、たとえばAl/TiあるいはAu/Wを用いれば良い。

【0168】最後に、サファイア基板の半導体多層膜面と相反する面側を研磨することにより、半導体多層膜面およびサファイア基板を含めた層厚が30～300 μ m（たとえば60 μ m）となるようにする。その後、劈開を用いて素子長が約0.5mmとなるようにして、ミラーとなる端面を形成した。

【0169】以上により、図17に示す窒素化合物半導体を用いた青紫色の発光波長を有するレーザが作製できる。

【0170】本実施の形態における半導体レーザ素子においては、p型クラッド層中にも、InGaN緩衝層が介装された、p型AlGaInNクラッド層を備えた構造になっている。n型AlGaInNクラッド層およびp型AlGaInNクラッド層中に介装された、複数のInGaN緩衝層の膜厚およびIn混晶比は、レーザ発振モードがInGaN緩衝層と、その近隣層であるAlGaNクラッド層で構成される3層スラブ導波路に結合しない条件式（1）が成り立つように設計されている。より具体的には、n型（p型）AlGaInNクラッド層中にn型（p型）InGaN緩衝層が単数または複数介装されているとすると、n型AlGaNクラッド層（膜厚は無有限大）/n型GaNガイド層/InGaN多重量子井戸活性層/p型AlGaNキャリアストップ層/p型GaNガイド層/p型AlGaNクラッド層（膜厚は無有限大）で構成される多層スラブ導波路に生じる導

波モード（等価屈折率 n_{eq} 、電界振幅 $f_{eq}(x)$ ）と、 i 番目（ $i=1, 2, \dots$ ）のn型（またはp型）InGaN緩衝層をコアとする3層スラブ導波路（AlGaNクラッド層（膜厚は無有限大）/InGaN緩衝層/AlGaNクラッド層（膜厚は無有限大））に生じる導波モード（等価屈折率 n_i 、電界振幅 $f_i(x)$ ）とを考えることにより計算されるパラメータFが、（1）式を満たすように i 番目のInGaN緩衝層のIn混晶比および膜厚が設定されている。

10 【0171】（1）式を満たすInGaN緩衝層の屈折率および膜厚の範囲は、図5～図8より求まる範囲と同じであった。

【0172】p型クラッド層中にInGaN緩衝層を介装した場合、以下のようなメリットを生ずる。レーザ発振モードの電界分布がp型GaNコンタクト層へ染み出し、これによるレーザ発振モードの活性層閉じ込め係数の低下や、FFPにおけるリップルの発生を防止するためには、p型クラッド層の膜厚は厚いほど望ましいが、結晶成長の困難さのため、p型GaN層上に歩留まり良く成長できるp型AlGaNクラッド層の層厚は制限される。しかし、p型AlGaNクラッド層を、InGaN緩衝層を介して多段成長することにより、p型AlGaInNクラッド層の層膜厚を厚くすることが可能となる。これにより、レーザ発振モードのp型GaNコンタクト層への染み出しが抑制され、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数の低下や、FFPにおけるリップル発生を、防止できるという効果が発生する。

30 【0173】また、p型クラッド層の層膜厚を厚くすることによる特有の効果として、p型GaNコンタクト層を厚くすることができる。従来は、p型GaNコンタクト層を厚くすると、p型GaNコンタクト層へのレーザ発振モードの染み出しにより、活性層閉じ込め係数の低下や、FFPにおけるリップルの発生が顕著になるため、p型GaNコンタクト層は厚く成長できなかった。このため、半導体レーザ素子の作製工程において、劈開端面を作製すると、p型GaNコンタクト層とn型GaNコンタクト層の厚さが異なるため、作製した劈開端面が活性層近傍で半導体成長面に対し垂直に作製できないという問題があった。また、従来の半導体レーザをCuのヒートシンクにマウントする際、半導体成長面側とCuヒートシンクが向かい合うように接着すると、接着に用いられる材料（Inなど）が表面張力のため半導体レーザ素子チップの側面に付着し、p型半導体層とn型半導体層がこれにより導通し、素子不良を起こす確率が高くなるため、従来の半導体レーザをマウントする際は基板側とCuヒートシンクが向かい合うように接着するしかなかった。しかし、p型クラッド層の層膜厚が厚くなったことにより、p型GaNコンタクト層への染み出しが抑制されるため、p型GaNコンタクト層を厚く成長50 できるようになった。その結果、作製した劈開端面は活

性層近傍で半導体成長面に対し垂直に作製できるようにした。またCuヒートシンクへマウントする際、半導体成長面側とCuヒートシンクが向かい合うように接着できるように、半導体レーザ装置全体の温度特性が向上した。

【0174】本実施の形態で作製したレーザ素子のほとんど全てが発振し、発振の閾値電圧 (V_{th}) が約5V、閾値電流密度 (J_{th}) が $1\text{ kA}/\text{cm}^2$ であった。また、従来の半導体レーザでは、クラックがない素子においても、連続して10時間以上発振を継続させていると、光出力が急激に低下する現象が生じてきたが、n型AlGaInクラッド層中にn型InGaIn緩衝層を挿入した本実施例に示すレーザは、約1000時間経過しても、特性の変化は見られなかった。また、FFPは単峰であり、良好な光学特性が実現できた。

【0175】なお、本実施の形態においては、n型AlGaInNクラッド層中に含まれるn型AlGaInクラッド層、およびp型AlGaInにおけるAl混晶比は必ずしも全て同じである必要はなく、その際においても前記Fなるパラメータが(1)式を満たすように設計されたInGaIn緩衝層をn型AlGaInNクラッド層中に含む構造を有する半導体レーザ素子であれば、本発明の効果は発生する。しかし、レーザ発振モードの対称性を考慮すれば、半導体レーザ素子構造中におけるAlGaInクラッド層のAl混晶比は全て同一にすることが望ましい。

【0176】また、本実施の形態において、活性層は3重量量子井戸としたが、2層または4層以上の多重量子井戸にしても、本発明において必要とされる関係式(1)およびInGaIn緩衝層に関して必要とされる関係式は変わらず、発生する効果は同じであった。

【0177】また、本実施の形態において、ガイド層はGaInとしたが、InGaInガイド層にしても、本発明において必要とされる関係式(1)およびInGaIn緩衝層に関して必要とされる関係式は図10～15に示したものと変わらず、発生する効果は同じであった。

【0178】なお、本実施の形態における半導体レーザの構造でn型AlGaInNクラッド層とn型GaInコンタクト層の間に介装されるn型InrGa1-rN緩衝層は、半導体多層ウェハのクラックをさらに減少させる効果を有するが、なくても本発明の請求範囲に含まれるものであり、半導体レーザ素子の活性層閉じ込め係数およびFFPにはほとんど影響を与えない。

【0179】また、本実施の形態における半導体レーザ素子に用いた基板は、サファイアを用いたが、他の基板でも良く、たとえばGaIn基板でもよい。この場合、AlGaInNクラッド層中に介装されるInGaIn緩衝層の混晶比および膜厚が満たすべき条件の範囲は、サファイア基板の場合と同じであった。

【0180】(実施の形態5) 図18は、本発明の第5

の実施の形態を示す半導体レーザ素子の模式図である。図は、半導体レーザの導波路部分の共振器に垂直な断面を示している。本半導体レーザ素子は、(0001)C面サファイア基板1(膜厚30～300 μm)、GaIn低温バッファ層2(膜厚0～100nm)、n型GaInコンタクト層3(膜厚0.1～10 μm)、n型InrGa1-rN ($0 \leq r \leq 0.2$) 緩衝層41(膜厚0～200nm)、n型AlGaIn層(膜厚20～500Å)とn型GaIn層(膜厚20～500Å)を10～100層前後積層することよりなるn型AlGaIn超格子クラッド層181(平均組成 $0.08 \leq x1 \leq 0.2$ 、総膜厚0.2～1.5 μm)、n型Inp1Ga1-p1N ($0.001 \leq p1 \leq 0.2$) 緩衝層5(膜厚10～200nm)、n型AlGaIn層(膜厚20～500Å)とn型GaIn層(膜厚20～500Å)を10～100層前後積層することよりなるn型AlGaIn超格子クラッド層181(平均組成 $0.08 \leq x2 \leq 0.2$ 、総膜厚0.2～1.5 μm)、n型GaInガイド層6(膜厚0.08～0.15 μm)、InwGa1-wN ($0 < w < 0.2$) 井戸層とInvGa1-vN ($0 < v < w$) 障壁層との交互多層構造(障壁層/井戸層/.../井戸層/障壁層)からなる多重量子井戸活性層7(発光波長370～430nm、総膜厚5～60nm)、p型AlzGa1-zN ($0 < z < 0.3$) キャリアブロック層8(膜厚0～20nm)、p型GaInガイド層9(膜厚0.08～0.2 μm)、p型AlGaIn層(膜厚20～500Å)とp型GaIn層(膜厚20～500Å)を10～100層前後積層することよりなるp型AlGaIn超格子クラッド層182(平均組成 $0.08 \leq y1 \leq 0.15$ 、総膜厚0.2～1.5 μm)、p型Inq1Ga1-q1N ($0.001 \leq q1 \leq 0.2$) 緩衝層171(膜厚10～200nm)、p型AlGaIn層(膜厚20～500Å)とp型GaIn層(膜厚20～500Å)を10～100層前後積層することよりなるp型AlGaIn超格子クラッド層182(平均組成 $0.08 \leq y1 \leq 0.2$ 、総膜厚0.2～1.5 μm)、p型GaInコンタクト層11(膜厚0.01～10 μm)の各窒化物系半導体層が形成されている。

【0181】その上には、必要な形状の絶縁膜12が、メサ上の概略全面に形成されている。正電極13(たとえば、Pd/Au、Ni/Pd/Au、Pd/Pt/Au等)は、p型GaInコンタクト層の一部露出した面上の全面を含む、メサ状の概略全面に形成されている。負電極14(たとえば、Ti/Al、Zr/Al、Hf/Alなど)は、n型GaInコンタクト層の一部露出した面上に形成されている。メサは、n型GaInコンタクト層、n型InGaIn緩衝層、n型AlGaInNクラッド層、n型GaInガイド層、InGaIn多重量子井戸活性層、p型AlGaInキャリアブロック層、p型GaInガイド層、p型AlGaInクラッド層、p型GaInコン

タクト層、絶縁膜（但し前記絶縁膜は必要領域のみ）、正電極より構成されている。ストライプの両端面はミラーとして働き、光共振器を構成している。また、 n 型 AlGaInN クラッド層15は、 n 型 AlGaInN 層と n 型 GaInN 層を10～100層前後積層することよりなる n 型 AlGaInN 超格子クラッド層、 n 型 $\text{In}_{p1}\text{Ga}_{1-p1}\text{N}$ 緩衝層、 n 型 AlGaInN 層と n 型 GaInN 層を10～100層前後積層することよりなる n 型 AlGaInN 超格子クラッド層で構成されており、総膜厚は0.8～10 μm となっている。 p 型 AlGaInN クラッド層172は、 p 型 AlGaInN 層と p 型 GaInN 層を10～100層前後積層することよりなる p 型 AlGaInN 超格子クラッド層、 p 型 $\text{In}_{q1}\text{Ga}_{1-q1}\text{N}$ 緩衝層、 p 型 AlGaInN 層と p 型 GaInN 層を10～100層前後積層することよりなる p 型 AlGaInN 超格子クラッド層で構成されており、総膜厚は0.8～10 μm となっている。

【0182】次に、本実施の形態における半導体レーザの製造方法について述べる。まず、(0001)C面サファイア基板を洗浄する。洗浄した(0001)C面サファイア基板をMOCVD装置内に導入し、 H_2 雰囲気の中で、約1100℃の高温でクリーニングを行う。その後、降温して、キャリアガスとして水素(H_2)を10リットル/分 min 流しながら、600℃で NH_3 とトリメチルガリウム(TMG)をそれぞれ5リットル/分 min 、20 mol/min 導入して、0～100nm（たとえば約20nm）の厚みの GaInN 低温バッファ層を成長する。低温バッファ層としては、 GaInN に限らず、トリメチルアルミニウム(TMA)、TMG、 NH_3 を使用して、 AlInN 膜や GaAlInN 膜を用いてもなら影響はない。

【0183】次に、 N_2 と NH_3 をそれぞれ5リットル/分 min 流しながら約1050℃まで昇温する。温度が上がれば、キャリアガスを N_2 から H_2 に代えて、TMGを100 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、 SiH_4 を10 nmol/min 導入して、 n 型 GaInN コンタクト層を0.1～10 μm （たとえば約4 μm ）成長する。次に、TMGの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、約800℃まで降温後、TMGを15 $\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、インジウム原料であるトリメチルインジウム(TMI)を一定量流しながら、 $\text{In}_{r}\text{Ga}_{1-r}\text{N}$ 緩衝層（たとえば $r=0.07$ ）を0～200nm（たとえば50nm）成長する。

【0184】次に、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に代えて、TMGの流量を50 $\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、TMAを一定量導入して、 n 型 $\text{Al}_{x11}\text{Ga}_{1-x11}\text{N}$ クラッド層（たとえば $x11=0.2$ ）を20～500Å（たとえば20Å）の厚さで成長する。次にTMAの供給を停止し、 n 型 GaInN 層を20～500Å（たとえば20Å）成長する。このようにして、 n 型

AlGaInN 層と n 型 GaInN 層の交互積層構造（ n 型 AlGaInN 層/ n 型 GaInN 層/.../ n 型 GaInN 層/ n 型 AlGaInN 層）からなる n 型 AlGaInN 超格子クラッド層（たとえば平均組成 $x1=0.1$ 、たとえば総膜厚0.8 μm ）を成長する。次に、TMGおよびTMAの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、約800℃まで降温後、TMGを15 $\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、TMIを一定量流しながら、 $\text{In}_{p}\text{Ga}_{1-p}\text{N}$ 緩衝層（たとえば $p=0.02$ ）を10～200nm（たとえば50nm）成長する。

【0185】次に、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に代えて、TMGの流量を50 $\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、TMAを一定量導入して、 n 型の $\text{Al}_{x21}\text{Ga}_{1-x21}\text{N}$ クラッド層（たとえば $x21=0.2$ ）を20～500Å（たとえば20Å）の厚さで成長する。次にTMAの供給を停止し、 n 型 GaInN 層を20～500Å（たとえば20Å）成長する。このようにして、 n 型 AlGaInN 層と n 型 GaInN 層の交互積層構造（ n 型 AlGaInN 層/ n 型 GaInN 層/.../ n 型 GaInN 層/ n 型 AlGaInN 層）からなる n 型 AlGaInN 超格子クラッド層（たとえば平均組成 $x2=0.1$ 、たとえば総膜厚0.8 μm ）を成長する。

【0186】 n 型 AlGaInN 超格子クラッド層の成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGを100 $\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整して、 n 型 GaInN ガイド層を0.08～0.15 μm （たとえば0.1 μm ）の厚さになるように成長する。その後、TMGの供給を停止して、キャリアガスを H_2 から N_2 に再び代えて、700℃まで降温し、インジウム原料であるトリメチルインジウム(TMI)を10 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、TMGを15 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 導入し、 $\text{In}_{v}\text{Ga}_{1-v}\text{N}$ （たとえば $v=0.05$ ）よりなるたとえば4nm厚の障壁層を成長する。その後、TMIの供給を50 $\mu\text{mol}/\text{min}$ に増加し、 $\text{In}_{w}\text{Ga}_{1-w}\text{N}$ （たとえば $w=0.17$ ）よりなるたとえば2nm厚の井戸層を成長する。たとえば、井戸層は合計3層、同様の手法で成長を行い、井戸層と井戸層との間および両側には合計4層の障壁層が存在するような発光波長約380～430nm（たとえば400～410nm）の多重量子井戸(MQW)を成長する。MQWの成長が終了すると、TMIおよびTMGの供給を停止して、再び1050℃まで昇温し、キャリアガスを再び N_2 から H_2 に代えて、TMGを50 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、TMAを30 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、 p 型ドーピング原料であるビスシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp_2Mg)を10 nmol/min 流し、0～20nm（たとえば20nm）厚の p 型 $\text{Al}_{z2}\text{Ga}_{1-z2}\text{N}$ （たとえば $z=0.2$ ）キャリアブロック層を成長する。キャリアブロック層の成長が終了すると、TMAの供給を停止し、TMGの供給量を100 $\mu\text{mol}/\text{min}$ に調整し、

て、 $0.08 \sim 0.15 \mu\text{m}$ (たとえば $0.1 \mu\text{m}$) の厚さのp型Ga_{1-y₁}Nクラッド層を成長する。

【0187】その後、TMAを一定量導入して、p型のAl_{y₁}Ga_{1-y₁}Nクラッド層 (たとえば $y_1=0.2$) を $20 \sim 500 \text{ \AA}$ (たとえば 20 \AA) の厚さで成長する。次にTMAの供給を停止し、p型Ga_{1-q₁}N層を $20 \sim 500 \text{ \AA}$ (たとえば 20 \AA) 成長する。このようにして、p型AlGa_{1-q₁}N層とp型Ga_{1-q₁}N層の交互積層構造 (p型AlGa_{1-q₁}N層/p型Ga_{1-q₁}N層/.../p型Ga_{1-q₁}N層/p型AlGa_{1-q₁}N層) からなるp型AlGa_{1-q₁}N超格子クラッド層 (たとえば平均組成 $y_1=0.1$ 、たとえば総膜厚 $0.8 \mu\text{m}$) を成長する。

【0188】次に、TMGおよびTMAの供給を停止し、キャリアガスをH₂からN₂に再び代えて、約 800°C まで降温後、TMGを $15 \mu\text{mol/min}$ に調整し、TMIを一定量流しながら、p型In_{q₁}Ga_{1-q₁}N緩衝層 (たとえば $q_1=0.02$) を $10 \sim 200 \text{ nm}$ (たとえば 50 nm) 成長する。

【0189】次に、TMIおよびTMGの供給を停止し、再び 1050°C まで昇温し、キャリアガスを再びN₂からH₂に代えて、TMGの流量を $50 \mu\text{mol/min}$ に調整し、TMAを一定量導入して、n型のAl_{y₂}Ga_{1-y₂}N層 (たとえば $y_2=0.2$) を $20 \sim 500 \text{ \AA}$ (たとえば 20 \AA) の厚さで成長する。次にTMAの供給を停止し、Ga_{1-y₂}N層を $20 \sim 500 \text{ \AA}$ (たとえば 20 \AA) 成長する。このようにして、n型AlGa_{1-y₂}N層とn型Ga_{1-y₂}N層の交互積層構造 (n型AlGa_{1-y₂}N層/n型Ga_{1-y₂}N層/.../n型Ga_{1-y₂}N層/n型AlGa_{1-y₂}N層) からなるn型AlGa_{1-y₂}N超格子クラッド層 (たとえば平均組成 $y_2=0.1$ 、たとえば総膜厚 $0.8 \mu\text{m}$) を成長する。

【0190】最後に、TMGの供給を $100 \mu\text{mol/min}$ に調整して、TMAの供給を停止し、 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ (たとえば $0.1 \mu\text{m}$) 厚のp型Ga_{1-p₁}Nコンタクト層の成長を行い発光素子構造の成長を終了する。成長が終了すると、TMGおよびCp₂Mgの供給を停止して降温し、室温でMOCVD装置より取り出す。

【0191】本レーザ構造を有する膜の最表面 (成長終端面) の表面粗さの平均値 (Ra) は約 10 nm であり、大変良好な平坦性を示した。また、(0001)C面サファイア基板、Ga_{1-p₁}N低温バッファ層 (膜厚 20 nm)、n型Ga_{1-p₁}Nコンタクト層 (膜厚約 $4 \mu\text{m}$)、n型AlGa_{1-p₁}N超格子クラッド層 (膜厚 $0.8 \mu\text{m}$)、n型In_{0.03}Ga_{0.97}N緩衝層 (膜厚 50 nm)、n型AlGa_{1-p₁}N超格子クラッド層 (膜厚 $0.8 \mu\text{m}$) なる構造を有するウェハを複数枚作製し、表面を光学顕微鏡で約 200 倍に拡大して観察したところ、全てのウェハにおいて六角形のクラックは確認されなかった。このウェハにおいて、n型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層の膜厚合計は約 $1.6 \mu\text{m}$ であった。従来の技術における課題

が解消されたのは、n型クラッド層中に少なくともInを含む緩衝層が形成されたことによる効果に他ならない。

【0192】その後、フォトリソグラフィ技術および反応性イオンエッチング技術を用い、p型Ga_{1-p₁}Nコンタクト層を $3 \mu\text{m}$ 幅のストライプ状に残して、p型AlGa_{1-p₁}N超格子クラッド層までエッチングを行い、光導波路を形成した後、フォトリソグラフィ技術を用いてp型Ga_{1-p₁}Nコンタクト層が電極と接触する部分を除いて絶縁膜を形成する。その後、反応性イオンエッチング技術を用いて、ウェハ最表面よりn型Ga_{1-p₁}Nコンタクト層の途中まで、負電極を形成する部分を除去する。その後、メサ状のp型Ga_{1-p₁}Nコンタクト層の一部露出した面上に、正電極を形成する。電極材料としては、たとえばAu/NiあるいはAu/Pdを用いれば良い。また、n型Ga_{1-p₁}Nコンタクト層の一部露出した面上の概略全面に、負電極を形成する。負電極材料としては、たとえばAl/TiあるいはAu/Wを用いれば良い。

【0193】最後に、サファイア基板の半導体多層膜面と相反する面側を研磨することにより、半導体多層膜面およびサファイア基板を含めた層厚が $30 \sim 300 \mu\text{m}$ (たとえば約 $60 \mu\text{m}$) となるようにする。その後、劈開を用いて素子長が約 0.5 mm となるようにして、ミラーとなる端面を形成した。

【0194】以上により、図18に示す第5の実施の形態の半導体レーザ素子が作製できる。

【0195】本実施の形態においては、他の実施の形態と比較すると、n型およびp型のAlGa_{1-p₁}Nクラッド層中における、AlGa_{1-p₁}Nクラッド層が、AlGa_{1-p₁}N超格子クラッド層になっている。これを用いることにより、さらなるクラック低減効果が生じた。

【0196】また、本実施の形態において、AlGa_{1-p₁}Nクラッド層中におけるInGa_{1-p₁}N緩衝層の混晶比および膜厚は、レーザ発振モードがInGa_{1-p₁}N緩衝層と、その近隣層であるn型AlGa_{1-p₁}Nクラッド層で構成される3層スラブ導波路に結合しない条件式(1)が成り立つように設計されている。ここで、(1)を計算する際、AlGa_{1-p₁}N超格子クラッド層を、単層のAlGa_{1-p₁}Nクラッド層に置き換えて計算すればよい。但しその場合、仮想的なAlGa_{1-p₁}Nクラッド層の混晶比は、AlGa_{1-p₁}N超格子クラッド層の平均混晶比と同じ値にとり、膜厚はAlGa_{1-p₁}N超格子クラッド層の総膜厚と同じにとる。このようにして求める、(1)式を満たすInGa_{1-p₁}N緩衝層の混晶比および膜厚の範囲は、図5～図8より求める範囲と同じであった。

【0197】本実施の形態で作製したレーザ素子のほとんど全てが発振し、発振の閾値電圧 (V_{op}) が約 5 V 、閾値電流密度 (J_{th}) が 1 kA/cm^2 であった。

また、従来の半導体レーザでは、クラックがない素子においても、連続して 10 時間以上発振を継続させている

と、光出力が急激に低下する現象が生じてきたが、n型AlGaInクラッド層中にn型InGaIn緩衝層を挿入した本実施例に示すレーザは、約1000時間経過しても、特性の変化は見られなかった。また、FFPは単峰であり、良好な光学特性が実現できた。

【0198】なお、本実施の形態においては、n型AlGaInクラッド層中に含まれるn型AlGaInクラッド層、およびp型AlGaInにおけるAl混晶比は必ずしも全て同じである必要はなく、その際においても前記Fなるパラメータが(1)式を満たすように設計されたInGaIn緩衝層をn型AlGaInクラッド層中に含む構造を有する半導体レーザ素子であれば、本発明の効果は発生する。しかし、レーザ発振モードの対称性を考慮すれば、半導体レーザ素子構造中におけるAlGaInクラッド層のAl混晶比は全て同一にすることが望ましい。

【0199】また、本実施の形態において、活性層は3重量子井戸としたが、2層または4層以上の多重量子井戸にしても、本発明において必要とされる関係式(1)およびInGaIn緩衝層に関して必要とされる関係式は変わらず、発生する効果は同じであった。

【0200】また、本実施の形態において、ガイド層はGaInとしたが、InGaInガイド層にしても、本発明において必要とされる関係式(1)およびInGaIn緩衝層に関して必要とされる関係式は図10～図15に示したものと変わらず、発生する効果は同じであった。

【0201】また、本実施の形態において、n型AlGaInクラッド層中に介装されたn型InGaIn緩衝層、およびp型AlGaInクラッド層中に介装されたp型InGaIn緩衝層は、それぞれ1層ずつであったが、一方または双方ともに、それぞれ2層以上あってもよく、導波モードの電界分布($f_{0q}(x)$)および等価屈折率(n_{0q})と、各InGaIn緩衝層において生ずる導波モードの電界分布($f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 \dots 、 $f_i(x)$ 、 \dots)および等価屈折率(n_1 、 n_2 、 \dots 、 n_i 、 \dots)とで決定される F_1 、 F_2 、 \dots 、 F_i 、 \dots のうち、 $F_i < 0.4$ を満たす層が存在するとき、そのInGaIn緩衝層へのモード結合による影響は無視できるほど小さくなる。n型AlGaInクラッド層内に存在するInGaIn緩衝層のうち、上記条件を満たす層が少なくとも1層あれば、FFPにおけるリップルの抑制、および活性層への閉じ込め係数の向上という効果が発生する。

【0202】また、本実施の形態において、n型クラッド層およびp型クラッド層の両方に、InGaIn緩衝層が介装されている必要はなく、n型クラッド層のみがAlGaInクラッド層であってよく、またはp型クラッド層のみがAlGaInクラッド層であってよい。

【0203】なお、本実施の形態における半導体レーザ

の構造でn型AlGaInクラッド層とn型GaInコンタクト層の間に介装されるn型InGaIn緩衝層は、半導体多層ウェハのクラックをさらに減少させる効果を有するが、なくとも本発明の請求範囲に含まれるものであり、半導体レーザ素子の活性層閉じ込め係数およびFFPにはほとんど影響を与えない。

【0204】また、本実施の形態における半導体レーザ素子に用いた基板は、サファイアを用いたが、他の基板でも良く、たとえばGaIn基板でもよい。この場合、AlGaInクラッド層中に介装されるInGaIn緩衝層の混晶比および膜厚が満たすべき条件の範囲は、サファイア基板の場合と同じであった。

【0205】(実施の形態6)図19は、本実施の形態の光学式情報再生装置を示す図である。基台1001、基台1001上に設置された実施の形態1の半導体レーザ素子1002、コリメータレンズ1003、ビームスプリッタ1004、対物レンズ1005、光ディスク1006、反射光を集光するためのレンズ1007、集光された光を検出する光検出器1008からなっている。この光学式情報再生装置において、半導体レーザ素子1002から出射したレーザ光は、コリメータレンズ1003で平行光もしくは平行に近い光に変換され、ビームスプリッタ1004を透過して、対物レンズ1005により光ディスク1006の情報記録面に集光される。光ディスク1006の情報記録面には、凹凸もしくは磁気変調もしくは屈折率変調によりビット情報が書き込まれている。集光されたレーザ光は、そこで反射され、対物レンズ1005を通してビームスプリッタ1004によって分岐され、反射光を集光するためのレンズ1007によって光検出器1008に集光され、光学的に検出された信号を電気的信号に変換して記録情報の読み取りが行われる。

【0206】本実施の形態の光学式情報再生装置においては、FFPのリップルが抑制された光学的特性の良好な半導体レーザ素子を用いたので、対物レンズ1005により光ディスク1006の情報記録面に高解像に集光されていた。たとえば、表1でcase1のInGaIn緩衝層を有する半導体レーザ素子を図19の半導体レーザ素子1001として用いた光学式情報再生装置においては、 $5\text{M}/\text{mm}^2$ もの高密度で記録された光ディスクから、ビット誤り率 10^{-6} で、書き込まれた情報を読み出すことが出来た。また、表1でcase2、case3、case4のInGaIn緩衝層を有する半導体レーザ素子を用いた光学式情報再生装置においても、同様の条件で、ビット誤り率 10^{-6} 程度が得られた。一方、表1でcase5、case6のInGaIn緩衝層を有する半導体レーザ素子(これは本発明の請求範囲に含まれない半導体レーザ素子である)を図19における半導体レーザ素子1001に変えて用いたところ、同様の条件のもとで、ビット誤り率 10^{-3} 程度であり、実用に適さ

なかった。このように、高密度に記録された光ディスクから、低誤り率で情報を読み出したことにより、本実施の形態の光学式情報再生装置によれば、光ディスク上への高解像の集光が可能となったことが確認された。

【0207】さらに、本実施の形態の光学式情報再生装置における半導体レーザ素子1001を実施の形態2、3、4、5の半導体レーザ素子に置換したところ、いずれの場合においても、上述の条件で、ビット誤り率 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ が達成され、光ディスク上への高解像の集光が可能となったことが確認された。

【0208】なお、今回開示した上記実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではない。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更を含むものである。

【0209】

【発明の効果】本発明によれば、窒化ガリウム系半導体を用いた半導体レーザ素子において、n型クラッド層中にInGaAs緩衝層を介装することにより、クラッドの極めて少ない厚膜のクラッド層が成長可能となり、前記n型クラッド層上に成長する活性層の結晶性が向上し、閾値電流密度の低下、および半導体レーザ素子の歩留まり向上・寿命増加という効果を奏する。また、介装するInGaAs緩衝層の混晶比および膜厚を所定のものとするにより、レーザ発振モードのInGaAs緩衝層への結合、およびn型コンタクト層への結合を抑制できるため、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数の低下を抑制し、半導体レーザ素子の閾値電流密度のさらなる低減、およびFFPにおけるリップルの低減という効果を奏する。

【0210】また、p型クラッド層中にInGaAs緩衝層を介装することにより、p型クラッド層を厚膜とすることができるようになり、また、InGaAs緩衝層の組成および膜厚を所定のものとするにより、レーザ発振モードのInGaAs緩衝層への結合、およびp型GaAsコンタクト層への結合を抑制することができる。その結果、レーザ発振モードの正電極における吸収を抑制でき、閾値電流密度のさらなる低減を図ることが可能となる。また、p型GaAsコンタクト層を厚膜化できるため、半導体レーザ素子の共振器を構成する劈開ミラー端面の活性層近傍を半導体層に対し垂直にすることができるようになる。また、半導体レーザ素子を半導体成長面側とサブマウントが向き合うようにダイボンドしても、半導体レーザ素子のp型半導体層とn型半導体層との短絡による不良を抑制できるという効果を奏する。

【0211】本発明によれば、歩留まり良く、良好な光学特性を有する半導体レーザ素子を提供でき、このような半導体レーザ素子を光学式情報再生装置に用いることにより、高解像で集光できるようになり、高密度に記録された光ディスクの読み取りが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の半導体レーザ素子を示す模式図である。

【図2】 レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数の相対値と、Fパラメータとの相関を示したものである。

【図3】 レーザ発振モードの電界分布を表しており、図3(a)は $F < 0.4$ の場合、図3(b)は $F > 0.4$ の場合を示している。

【図4】 本発明に基づく第1の実施の形態における半導体レーザ素子の模式図である。

【図5】 InGaAs緩衝層のIn混晶比および膜厚が $F < 0.4$ を満たす範囲を図示したものであり、n型AlGaAsクラッド層およびp型AlGaAsクラッド層のAl混晶比を変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

【図6】 InGaAs緩衝層のIn混晶比および膜厚が $F < 0.4$ を満たす範囲を図示したものであり、InGaAs緩衝層とガイド層との距離を $0.4 \mu\text{m}$ 以上の範囲内で変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

【図7】 InGaAs緩衝層のIn混晶比および膜厚が $F < 0.4$ を満たす範囲を図示したものであり、InGaAs緩衝層とガイド層との距離を $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ の範囲内で変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

【図8】 InGaAs緩衝層のIn混晶比および膜厚が $F < 0.4$ を満たす範囲を図示したものであり、p型ガイド層およびn型ガイド層の膜厚を変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

【図9】 第1の実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、n型GaAsコンタクト層層厚を変化させた時の、レーザ発振モードの活性層閉じ込め係数の変化を表した図である。

【図10】 InGaAs緩衝層とガイド層との距離が $0.4 \mu\text{m}$ 以上あるような、第2の実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、 $F < 0.4$ を満たすようなInGaAs緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものであり、p型ガイド層およびn型ガイド層のIn混晶比を $0.02 \sim 0.06$ の範囲内で変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

【図11】 InGaAs緩衝層とガイド層との距離が $0.4 \mu\text{m}$ 以上あるような、第2の実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、 $F < 0.4$ を満たすようなInGaAs緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものであり、p型ガイド層およびn型ガイド層のIn混晶比を $0.06 \sim 0.09$ の範囲内で変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

93

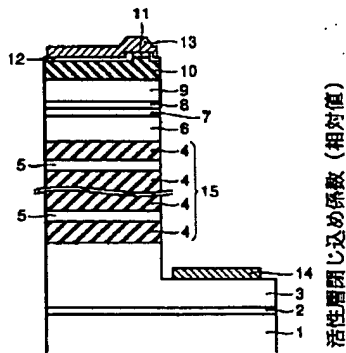
【図12】 InGa_N緩衝層とガイド層との距離が0.3~0.4 μmの範囲内にあるような、第2の実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、 $F < 0.4$ を満たすようなInGa_N緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものであり、p型ガイド層およびn型ガイド層のIn混晶比を0.02~0.06の範囲内で変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

【図13】 InGa_N緩衝層とガイド層との距離が0.3~0.4 μmの範囲内にあるような、第2の実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、 $F < 0.4$ を満たすようなInGa_N緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものであり、p型ガイド層およびn型ガイド層のIn混晶比を0.06~0.09の範囲内で変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

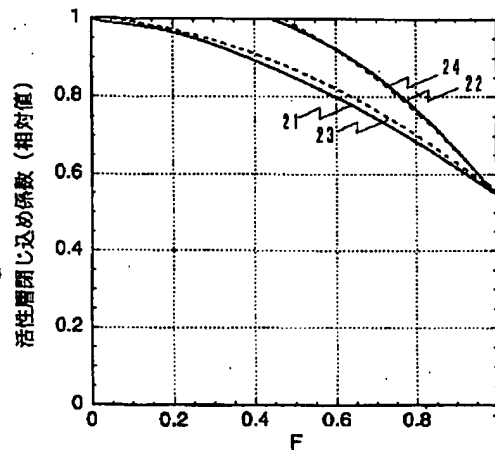
【図14】 InGa_N緩衝層とガイド層との距離が0.2~0.3 μmの範囲内にあるような、第2の実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、 $F < 0.4$ を満たすようなInGa_N緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものであり、p型ガイド層およびn型ガイド層のIn混晶比を0.02~0.06の範囲内で変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

【図15】 InGa_N緩衝層とガイド層との距離が0.2~0.3 μmの範囲内にあるような、第2の実施の形態の半導体レーザ素子の構造において、 $F < 0.4$ を満たすようなInGa_N緩衝層のIn混晶比および膜厚の範囲を図示したものであり、p型ガイド層およびn型ガイド層のIn混晶比を0.06~0.09の範囲内で変化させた時の、それぞれの場合における前記範囲の境界線の変化を示している。

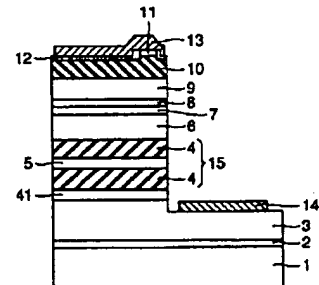
【図1】



【図2】



【図4】



【図16】 本発明に基づく第3の実施の形態における半導体レーザ素子の模式図である。

【図17】 本発明に基づく第4の実施の形態における半導体レーザ素子の模式図である。

【図18】 本発明に基づく第5の実施の形態における半導体レーザ素子の模式図である。

【図19】 本発明に基づく第6の実施の形態における光学情報再生装置の概念図である。

【図20】 本発明に基づく第1の実施の形態における条件式(1)すなわち $F < 0.4$ が成り立つ条件を示す図である。

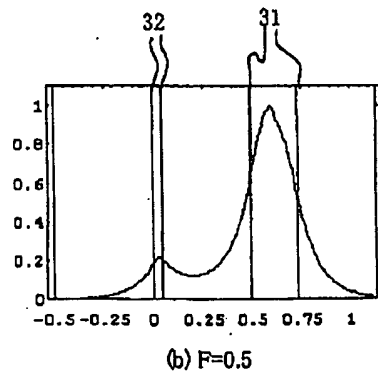
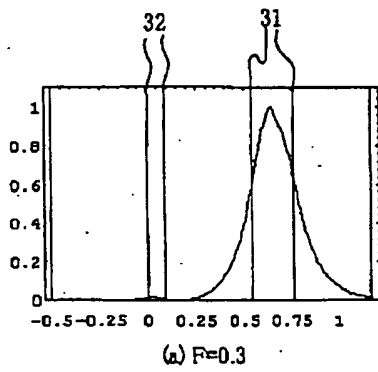
【図21】 本発明に基づく第1の実施の形態におけるInGa_N緩衝層を満たすべき領域を示す図である。

【図22】 従来技術に基づく半導体レーザ素子を示す模式図である。

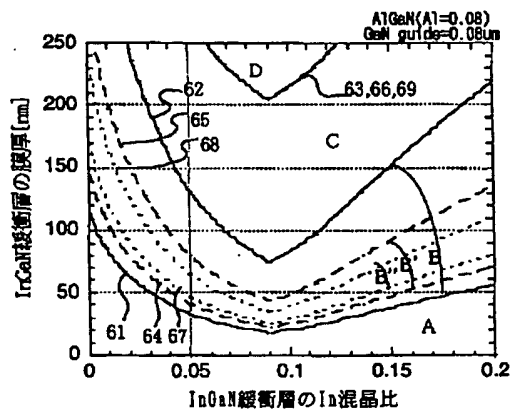
【符号の説明】

1 (0001) C面サファイア基板、2 Ga_N低温バッファ層、3 n型Ga_Nコンタクト層、4 n型Al_xGa_{1-x}N (0.08 ≤ x ≤ 0.2) クラッド層、5 n型In_pGa_{1-p}N (0 < p ≤ 0.2) 緩衝層、6 n型In_sGa_{1-s}N (0 ≤ s ≤ 0.1) ガイド層、7 InGa_N多重量子井戸活性層、8 p型Al_zGa_{1-z}N (0 ≤ z ≤ 0.3) キャリアブロック層、9 p型In_tGa_{1-t}N (0 ≤ t ≤ 0.1) ガイド層、10 p型Al_yGa_{1-y}N (0.08 ≤ y ≤ 0.2) クラッド層、11 p型Ga_Nコンタクト層、12 絶縁膜、13 正電極、14 負電極、15 n型AlGaInNクラッド層、41 n型In_rGa_{1-r}N (0 ≤ r ≤ 0.2) 緩衝層、171 p型In_qGa_{1-q}N (0.001 ≤ q ≤ 0.2) 緩衝層、172 p型AlGaInNクラッド層、181 n型AlGa_N超格子クラッド層、182 p型AlGa_N超格子クラッド層。

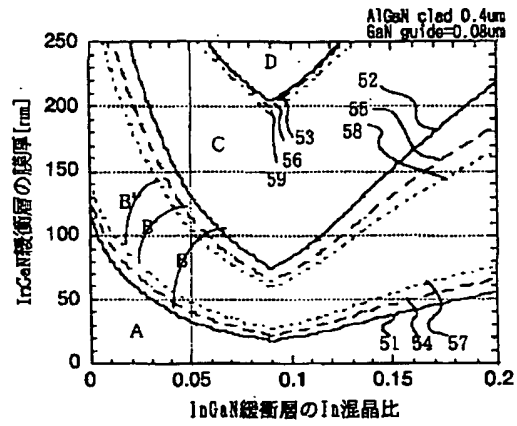
【図3】



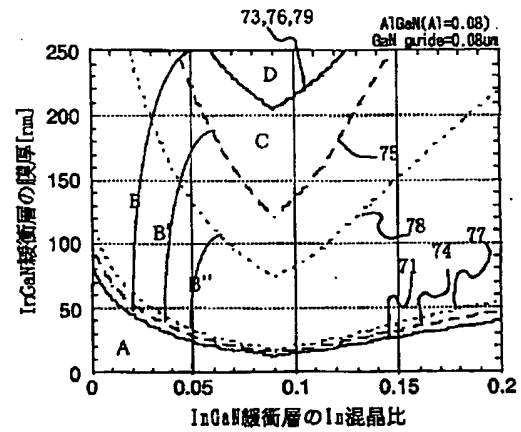
【図6】



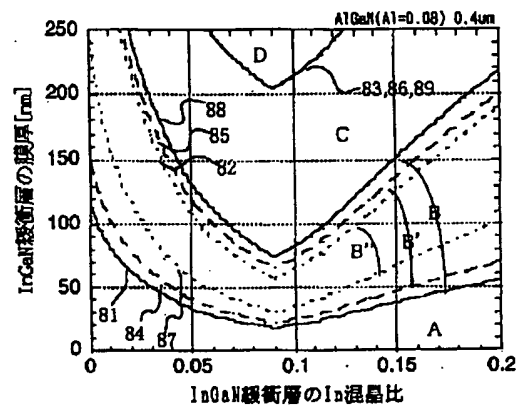
【図5】



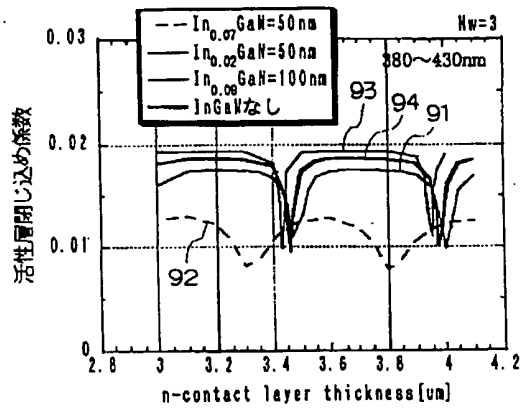
【図7】



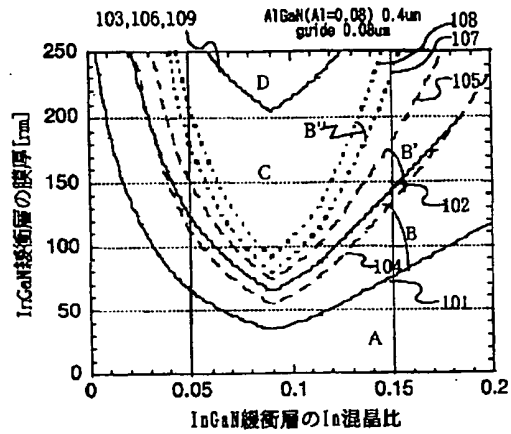
【図8】



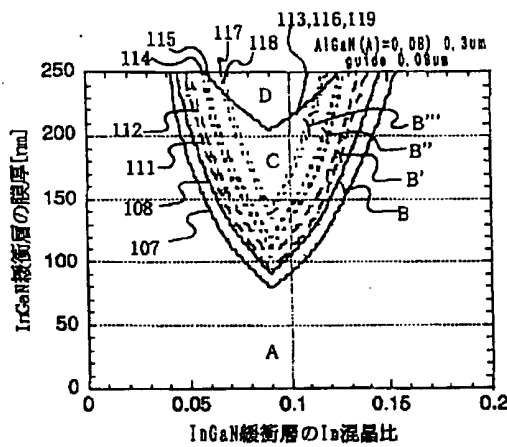
【図9】



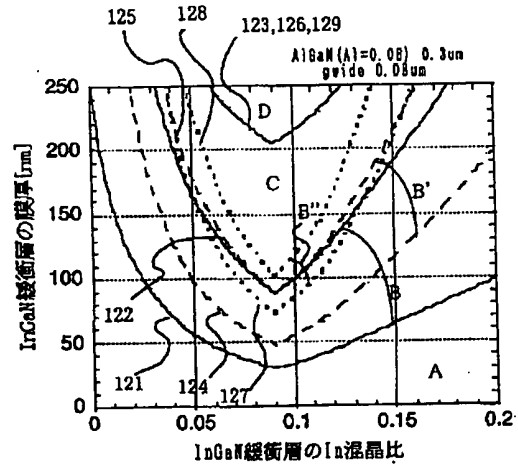
【図10】



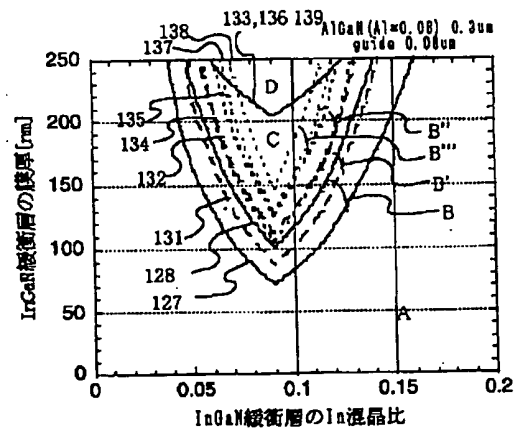
【図11】



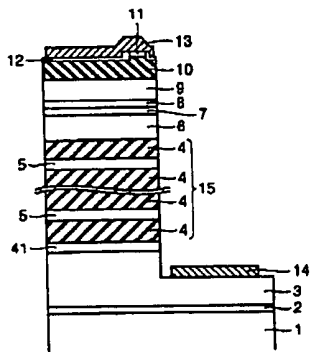
【図12】



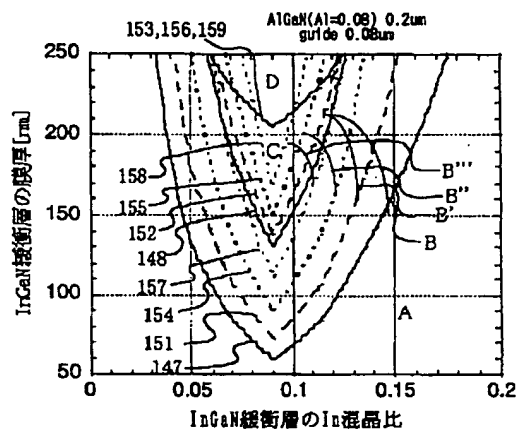
【図13】



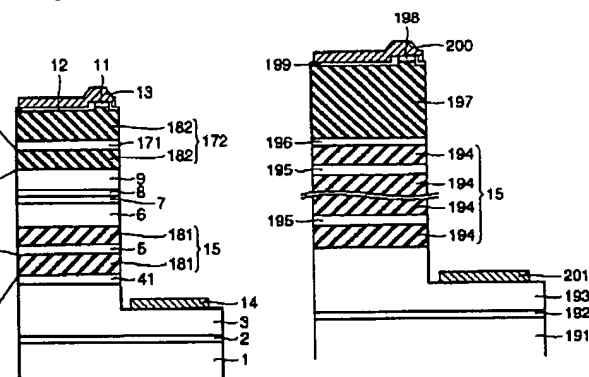
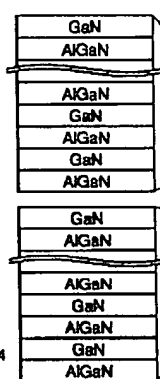
【図16】



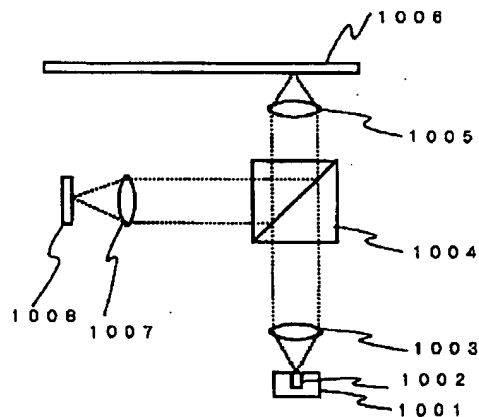
【例 15】



【图 18】



【图 20】



【図 21】

